

Э.А. ГРИКЕВИЧ

ГИДРАВЛИКА ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

Э.А.ГРИКЕВИЧ

ГИДРАВЛИКА ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН



МОСКВА „НЕДРА“ 1986

Грикевич Э.А. Гидравлика водозаборных скважин. — М.: Недра, 1986. 231 с.

Кратко изложены теоретические основы гидравлики водозаборных скважин и практические способы определения параметров пласта и скважины. Даны формулы определения интенсивности притока по длине фильтра, зависимости для расчета понижения уровня (напора) внутри скважины, величин входных скоростей, гидравлических потерь напора. Изложены методика пьезорасходомерии скважин для послойного определения фильтрационных свойств пласта в разрезе и методика моделирования скважин на электрических сеточных моделях с учетом гидравлического сопротивления скважины.

Для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами гидравлики скважин, водоснабжения, водопонижения и гидротехнического строительства.

Табл. 34, ил. 52, список лит. — 50 назв.

Рецензент: *Д.Н. Башкатов, д-р техн. наук* (МГРИ им. Серго Орджоникидзе)

Интенсивное развитие промышленного и сельскохозяйственного производства, увеличение добычи полезных ископаемых и освоение восточных районов страны в качестве топливно-энергетической базы привели к резкому увеличению объема гидрогеологических работ. На территории СССР для различных целей ежегодно сооружается около 50000 — 55000 водозаборных, дренажных и гидрогеологических скважин, эффективность использования которых зависит от совершенства применяемой технологии вскрытия и освоения пласта, правильного выбора конструкции скважин и достоверности проводимых гидрогеологических расчетов. В дальнейшем ожидается рост объемов бурения и увеличение глубин скважин, что обусловлено возрастающей потребностью в пресной воде, интенсивным строительством систем вертикального дренажа, орошения земель и обводнения пастбищ, большим использованием глубокозалегающих пресных, минеральных и промышленных вод. В настоящее время в СССР эксплуатируется около 500 тыс. водозаборных скважин.

Высокие требования, предъявляемые к точности результатов специальных гидрогеологических исследований, создание крупных водозаборных, оросительных и обводнительных систем, широкое применение вертикального дренажа и внедрение геотехнологических способов добычи полезных ископаемых ставят весьма сложные технические задачи, при решении которых нельзя ограничиться прежними знаниями о скважине. Необходимо учитывать, что наличие в пласте каптажного сооружения в виде скважины обуславливает деформации потока, величина которых зависит от степени вскрытия пласта, нарушений в призабойной зоне, фильтрационной неоднородности эксплуатируемого и смежного с ним пластов, интенсивности водоотбора, глубины заложения скважины и конструкции ее приемной части. Причем дополнительная потеря напора вследствие каптажа является сложной функцией от указанных выше факторов. Особенно важен учет влияния гидравлического сопротивления скважины при проектировании высокодебитных систем отбора жидкости и послойном определении параметров пласта непосредственно по возмущающей скважине. Следует помнить, что наблюдаемые в процессе опробования скважины показатели характеризуют не только свойства пласта, но и свойства системы пласт — скважина. Поэтому при интерпретации результатов опробования должны учитываться те дополнительные изменения в величинах напора и притока, которые обусловлены самой скважиной. Иначе возможны грубые просчеты в определении степени и характера неоднородности пласта, а следовательно, и в обосновании принимаемых моделей слоистых толщ и региональной оценке фильтрационных свойств пород, что весьма важно при сооружении систем эксплуатационных скважин и в гидротехническом строительстве.

Принимая во внимание актуальность рассмотрения вопросов гидравлики скважины при разработке методов определения послойной неоднородности пласта, учете последней на стадии проектирования систем отбора воды и оценке влияния интенсивности отбора на технологические показатели эксплуатации сооружаемых систем, во ВНИИморгео были проведены теоретические и экспериментальные исследования. В научно-методическом плане наибольшее внимание уделялось закономерностям течения жидкости в приемной части скважины и околоскважинной зоне, как наименее разработанной области инженерной гидрогеологии.

Некоторые из результатов проведенных исследований могут быть использованы при расчетах различных распределителей и сборников воды, воздухораспределителей и вытяжных воздухопроводов постоянного сечения, пневматических и гидравлических волноломов.

Автор благодарит д-ра техн. наук А.Ж. Муфтахова, д-ра техн. наук В.М. Шестакова, д-ра техн. наук М.С. Таршиша за обсуждение результатов исследований и высказанные ценные замечания, а также канд. техн. наук В.П. Ткаченко, инженеров Г.И. Агаркову, В.Е. Кузнецова и А.А. Руселиса за участие в экспериментальных исследованиях и апробации полученных решений.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- α — коэффициент пьезопроводности кусочно-однородного пласта;
- $\bar{\alpha}$ — обобщенный коэффициент пьезопроводности многослойной толщи;
- D — внутренний диаметр приемной части скважины;
- d — диаметр отверстия;
- F^0 — параметр внутреннего сопротивления приемной части скважины (перфорированной трубы);
- $F^* = F/16$ — приведенный параметр внутреннего сопротивления приемной части скважины;
- g — ускорение свободного падения;
- H_z и H_{0z} — потенциальные напоры соответственно внутри приемной части скважины и у ее наружной стенки;
- \bar{H} — безразмерный разностный напор;
- Δh_z — полная потеря напора внутри приемной части скважины в сечении z ;
- $\Delta h_{\psi(z)}$ — потеря напора, обусловленная прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра;
- $\Delta h_v(z)$ — потеря напора внутри приемной части, обусловленная изменением средней скорости потока вследствие присоединения частиц жидкости;
- $\Delta h_{\lambda(z)}$ — потеря напора внутри приемной части скважины, обусловленная турбулентным трением;
- Δh_τ — потеря напора в неперфорированной части фильтра и колоннах обсадных труб;
- k_z — коэффициент фильтрации элементарного слоя пласта;
- $k^n(z)$ — коэффициент фильтрации элементарного слоя призабойной зоны;
- \bar{k} — среднинегадральное значение коэффициента фильтрации многослойной толщи;
- km — водопроводимость кусочно-однородного пласта;

k_m — суммарная водопроводимость пород многослойной толщи;
 k_L — водопроводимость вскрытой части многослойной толщи;
 L — длина приемной части скважины;
 l — длина обсадных труб;
 m — мощность пласта (толщи);
 m — относительное вскрытие пласта;
 m_k, m_n, m_c — относительное вскрытие пласта при расположении фильтра соответственно у кровли, подошвы и в середине пласта;
 p — усредненное во времени и по живому сечению гидродинамическое давление;
 Q — дебит скважины;
 Q_z — расход жидкости, фиксируемый в приемной части скважины в сечении z ;
 Q_z^* — относительный расход жидкости в сечении z ;
 R — коэффициент сопротивления пласта в зоне фильтрации от ее внешних границ до $r = r_0$;
 R^* — коэффициент сопротивления пласта в зоне существенных деформаций потока $r_0 \leq r \leq \epsilon m$;
 R^{**} — параметр сопротивления пласта в области фильтрации от ее внешних границ до $r = \epsilon m$;
 R_k — радиус контура постоянного напора;
 r — координата рассматриваемой точки (расстояние от оси скважины);
 r_0 и r_* — соответственно внешние радиусы приемной части скважины и призабойной зоны;
 S — понижения уровня (напора) в скважине, фиксируемое в эксплуатационной колонне;
 S_{0z} — понижения уровня (напора) у наружной стенки приемной части скважины;
 \bar{S}_z — безразмерное разностное понижение уровня;
 S_z^* — действующее понижения уровня в сечении z ;
 t — время с начала откачки;
 $u_{r_n}(z)$ — среднее по периметру приемной части значения радиальной скорости присоединяющихся частиц жидкости в сечении z ;
 v — средняя скорость потока внутри приемной части скважины в сечении z ;
 \bar{v}_z — относительная скорость потока внутри приемной части;
 W — площадь поперечного сечения скважины (потока);
 W — площадь поперечного сечения отверстия;
 z — координата рассматриваемого сечения приемной части скважины;
 a — параметр распределения притока;
 $a_{n.p}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения и пульсацию скоростей по живому сечению потока;
 γ — параметр распределения потока;
 $\gamma_{ж}$ — удельный вес жидкости;
 ϵ — коэффициент зоны существенной деформации потока;
 ξ_n — коэффициент сопротивления, обусловленный нарушением естественной структуры пород призабойной зоны совершенной по степени вскрытия скважины;
 ξ_{ϕ} — коэффициент сопротивления, обусловленный перфорацией приемной части совершенной по степени вскрытия скважины;
 ξ_1^* — параметр сопротивления, обусловленный характером распределения притока по длине приемной части скважины и ее несовершенством по степени вскрытия пласта;
 ξ_2^* — параметр сопротивления, обусловленный нарушением призабойной зоны, ее кольматажем или суффозией и прерывистостью поступления жидкости через боковую поверхность приемной части скважины;
 ξ_3^* — параметр, зависящий от вида приемной поверхности скважины и эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра;

ξ_4^* — параметр, обусловленный нарушением линейного закона фильтрации;
 ξ_T^* — параметр сопротивления, учитывающий потери напора в глухой части фильтра и колоннах обсадных труб;
 η — скважность (пористость) приямной части скважины;
 λ — коэффициент гидравлического трения в неперфорированных трубах;
 λ_0 — суммарный коэффициент турбулентного трения;
 λ_m — коэффициент турбулентного трения, характеризующий потери напора вследствие смешения присоединяемых (отделяемых) масс жидкости с основным потоком и переработки профиля скоростей;
 μ — коэффициент расхода отверстия;
 μ^* — коэффициент упругой водоотдачи кусочно-однородного пласта;
 μ^{**} — суммарный коэффициент упругой водоотдачи многослойной толщ;
 ν — кинематический коэффициент вязкости;
 ρ — плотность жидкости;
 τ — турбулентное касательное напряжение;
 Φ — приведенный интегральный потенциал фильтрации;
 φ — приведенный потенциал скорости фильтрации;
 χ — смоченный периметр;
 Ψ_z — обобщенный коэффициент истечения жидкости в сечении z ;
 Ω_z — площадь поперечного сечения перед отверстием;
 ω — интенсивность массопритока;
 $0, z, L$ — соответственно нулевое, произвольное и выходное сечения приемной части скважины.

КРАТКИЙ ОБЗОР РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретическим и экспериментальным исследованиям зависимости между конструктивными параметрами скважины и гидравлическими характеристиками потока посвящено большое число публикаций. Преобладающая доля исследований относится к определению влияния длины, диаметра и положения приемной части скважины в пласте на ее производительность при пренебрежении гидравлическим сопротивлением ствола скважины и однородности продуктивной толщи. Так, в работах М. Маскета, Н.Н. Веригина, А.Л. Хейна, И.А. Чарного, М.Н. Тихова, В.П. Пилатовского, В.И. Шурова и других получены формулы для определения коэффициентов дополнительного сопротивления, обусловленных неполнотой вскрытия однородного пласта. Причем последняя рассматривалась как по степени вскрытия пласта, так и по характеру вскрытия различными типами отверстий, расположенными вертикально по образующей и в горизонтальной плоскости.

При изучении вопроса о подборе и расчете фильтров скважин С.К. Абрамов и В.М. Гаврилко отметили важность учета физико-химических свойств водовмещающей толщи и гранулометрического состава пород, контактирующих с водоприемной поверхностью фильтра. Комплекс опытов в фильтрационных трубках и лотках позволил С.К. Абрамову определить для разных типов фильтров рациональные размеры проходных отверстий в зависимости от коэффициента неоднородности пород и среднего диаметра частиц пород. В результате исследований, проведенных совместно с Г.В. Донским, было получено выражение для коэффициента расхода в условиях наложения частиц породы на проходные отверстия перфорированной трубы.

Обширные исследования по обобщению опыта эксплуатации водозаборных скважин, определению гидравлических сопротивлений фильтров различных конструкций, созданию новых конструкций фильтров и оценке их работы в различных условиях проведены В.М. Гаврилко, В.С. Алексеевым, В.М. Беляковым и Н.Д. Бессоновым. Разработке методов расчета гидравлического сопротивления фильтра и обоснованию способов подбора их рациональных размеров посвящены труды И.Ф. Володько и Н.А. Карамбирова. Большой объем натурных и лабораторных исследований, касающихся вопросов гидродинамического несовершенства скважин, выполнен П.Н. Костюковым.

Наиболее полные исследования по гидравлике потока в фильтре впервые были проведены И. Петерсеном, К. Ровером и М. Альбертсоном. В дальнейшем задача об истечении жидкости из пласта в скважину решалась Д.Ф. Шульгиным и В.А. Васильевым, М. Солимэном, В.И. Эмихом,

Д.Клотцем, В.С. Алексеевым, Э.А. Грикевичем, В.Л. Роговым и др. Во всех упомянутых исследованиях в качестве одного из допущений принималось постоянство напора вдоль наружной стенки скважины. Задачу с переменным напором вдоль стенки скважины решали Т.Г. Кульматовой и Д.Ф. Шульгин, С.Джердж и Я.Лэл, А.С. Чавла и Х.Д. Шарма, В.М. Шестаков, Э.А. Грикевич, И.М. Гершанович и др.

Случай отбора жидкости из совершенной скважины в неоднородном по проницаемости изолированном пласте с коэффициентом фильтрации, изменяющимся по экспоненциальному закону, рассмотрен Т.Г. Кульматовой и Д.Ф. Шульгиным. Полученное решение при пренебрежении трением внутри фильтра представлено в виде суммы конечных рядов. Этими авторами также приводится решение для случая однородного пласта с учетом трения.

Принимая допущение о послойном плоско-радиальном характере движения жидкости во всей области фильтрации, С.Джердж и Я.Лэл получили дифференциальное уравнение для потока жидкости внутри приемной части скважины в однородном пласте. Ввиду нелинейности полученное уравнение решалось методом конечных разностей. Аналогичное дифференциальное уравнение в безразмерном виде дали А.С. Чавла и Х.Д. Шарма.

На основе уравнения движения жидкости внутри перфорированной трубы, формулы Ж. Дюпюи и некоторых общих рассуждений И.М. Гершанович составил дифференциальное уравнение для потока внутри приемной части совершенной по степени вскрытия скважины при пренебрежении потерями напора внутри фильтра. Решение уравнения представлено в неявном виде относительно расхода потока в различных сечениях фильтра, поэтому расчеты предлагается проводить на ЭЦВМ.

Приближенный метод для решения уравнения С.Джерджа и Я. Лэла, основанный на аппроксимации распределения средней скорости потока внутри фильтра двучленным полиномом, предложил В.М. Шестаков. Кроме того, В.М. Шестаковым получена зависимость для расчета дополнительных потерь напора в фильтре совершенной по степени вскрытия скважины и дано выражение для определения погрешности, обусловленной пренебрежением гидравлического сопротивления скважины при интерпретации расходометрического каротажа.

Для разработки и уточнения основных положений гидравлики потока в скважине и вблизи нее автором были проведены новые исследования, позволяющие выполнить некоторые гидравлические расчеты. Последние связаны с решением задач выбора рациональной конструкции скважин, определения их производительности (понижения уровня), интерпретации данных опробования и гидрокаротажа опытных скважин.

УРАВНЕНИЕ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как известно, при отборе жидкости из пористой среды напор уменьшается по мере приближения от краевой зоны к скважине. Непосредственно у стенки скважины могут возникать дополнительные потери за счет уменьшения проницаемости призабойной зоны под влиянием буровых работ или коагуляционных процессов при откачке.

Характерная особенность отбора жидкости из скважины — непрерывное присоединение частиц жидкости, поступающих через боковую поверхность, к основному потоку внутри приемной части. Поэтому движение потока в приемной части скважины происходит с возрастающим вдоль пути расходом, т.е. с переменной массой. В связи с тем, что скорости входящих частиц отличаются по величине и направлению от скорости основного потока, присоединение частиц и выравнивание скоростей сопровождаются потерями энергии на удар, обмен количеством движения между частицами и перестройку профиля осевых скоростей. Втекание жидкости через боковую поверхность обуславливает появление нормальной составляющей на внутренней поверхности фильтровой части и, как следствие этого, разрушение пограничного слоя и преобразование его в дискретные вихри. В результате этого резко возрастает сопротивление движению, что выражается в дополнительном падении напора внутри приемной части скважины вдоль пути движения жидкости.

Дальнейшее движение жидкости в неперфорированной части фильтра и колоннах обсадных труб также сопровождается рассеиванием энергии потока. Это рассеивание вызвано работой на преодоление касательных сил, возникающих у стенок фильтра и обсадных колонн, сил, связанных с внезапным расширением потока по пути следования.

Движение частиц жидкости в породе, фильтре и обсадных колоннах неизбежно связано с потерей энергии, которая выражается как в снижении напора в периферийной области пласта, так и в дополнительном его снижении в зоне влияния скважины, непосредственно в призабойной зоне и стволе скважины. Таким образом, независимо от условий фильтрации (напорные или безнапорные) между уровнями за стенкой скважины и внутри ее существует разрыв (скачок уровня), зависящий от эффекта наложения частиц пород на проходные отверстия фильтра, особенностей конструкции водоприемной поверхности скважины и потерь напора в колоннах обсадных труб.

Следовательно, при заданном дебите понижение уровня внутри скважины, фиксируемое во время откачки в эксплуатационной колонне,

$$S = S_{0z} + \Delta h_{\psi(z)} + \Delta h_{z-L} + \Delta h_{\tau}, \quad (II\ 1)$$

В соотношениях (II. 1) и (II. 2) отражены факторы, определяющие характер притока жидкости в скважину. Для анализа количественных характеристик потока следует получить дифференциальные уравнения относительно понижений уровня и скоростей потока в скважине. При этом целесообразно рассмотреть отдельно внешнюю и внутреннюю задачи для скважины при заданной интенсивности притока вдоль приемной части. Под внешней задачей понимается фильтрация жидкости в пласте, под внутренней — истечение жидкости из пласта в скважину и движение жидкости внутри приемной части и в колоннах обсадных труб. Причем решения указанных задач должны быть справедливы для любого заданного распределения интенсивности бокового притока вдоль приемной части скважины. "Сшивание" полученных уравнений для внутренней и внешней задач осуществимо на основе принципа непрерывности давлений (понижений) при течении жидкости в сплошных средах, т.е. путем приравнивания полученных значений напоров (понижений) для любого сечения у наружной стенки скважины.

§ 2. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ НАПОРОМ И СКОРОСТЬЮ ПОТОКА ВНУТРИ ПРИЕМНОЙ ЧАСТИ СКВАЖИНЫ

Эксперименты на гидравлической установке, представляющей собой прозрачную модель перфорированной трубы [2], и скоростная киносъемка возмущений при вдуве газа в канал через проникаемые пластинки [19] свидетельствуют о том, что движение жидкости внутри приемной части водозаборной скважины при любой осевой скорости течения является турбулентным. Причем вблизи отверстий происходит разрушение пограничного слоя с образованием зон вихревого движения, размеры которых зависят от интенсивности истечения жидкости из отверстий и их взаимного расположения. Для поля скоростей в приемной части скважины характерно наличие поперечных составляющих, обуславливающих интенсивное перемешивание жидкости по всему потоку. Кроме того, частицы, которые расположены на поверхности любого из объемов, испытывают воздействие частиц, смежных с этим объемом. Под действием поверхностных сил происходит деформация переносимых объемов. Поэтому строгий вывод уравнений движения должен проводиться на основе анализа движения деформируемой среды с непрерывно меняющейся массой.

Как известно, для турбулентного режима потока в трубах не существует ни одного точного решения и нет общей законченной теории, которая позволила бы оценить влияние шероховатости стенок трубы на величину сопротивления, а также эффект присоединения частиц жидкости через проникаемую стенку [25]. Полученная О.Рейнольдсом [22, 25] система уравнений для общего случая усредненного турбулентного потока не замкнута ввиду наличия добавочных членов, характеризующих дополнительный перенос количества движения, который обусловлен пульсациями

скорости. Замыкание системы возможно лишь на феноменологическом уровне.

Попытки получения точного решения уравнения турбулентного течения в условиях присоединения или отсоединения частиц жидкости (газа) через проницаемые стенки также не привели к успеху [25], несмотря на широкое использование эффекта смешения струй в системах вентиляции, водоснабжения, очистки жидкостей, впрыскивание топлива и при пористом охлаждении. Имеющиеся приближенные инженерные решения базируются на многих допущениях и в качестве обязательного элемента включают параметры, определяемые экспериментальным путем [8, 10, 18, 27].

Дифференциальные уравнения движения одномерного "плавно" изменяющегося потока с переменным расходом вдоль пути были получены Я.Т. Ненько, В.И. Маккавеевым, И.М. Коноваловым, П.Г. Киселевым, Г.А. Петровым, М.С. Таршишем и другими на основе законов механики тел с переменной массой для решения задач расчета гидравлического прыжка, бокового водослива, горизонтального дырчатого трубопровода и канала с раздачей расхода по пути. Наиболее полный и строгий в гидродинамическом отношении вывод общего дифференциального уравнения турбулентного потока несжимаемой жидкости с переменным расходом дан Т.Г. Войничем-Сяноженцким. При усреднении уравнений Навье — Стокса и некоторых упрощениях уравнение движения жидкости в приемной части дрены получено М.Г. Хубларяном.

Хотя эти уравнения можно использовать при решении задач притока жидкости в скважину, все же некоторый интерес, по мнению автора, представляет получение уравнения движения несжимаемой жидкости в приемной части скважины в упрощенной постановке.

Примем, что движение жидкости в любом из сечений приемной части однозначно характеризуется величинами среднего по сечению давления и средней скоростью потока, которая равна расходу жидкости в этом же сечении, деленному на площадь поперечного сечения. Назовем этот поток основным. Реальное турбулентное поле будем считать стационарным по отношению к усредненному течению. В движущейся жидкости выделим фиксированный объем высотой Δz (рис. 11. 2) и примем, что в начальный момент времени масса жидкости выделенного объема m , а средняя скорость в рассматриваемом сечении потока v_z . Разделим турбулентный поток в приемной части скважины на две области с различными режимами течения: область турбулентного течения, направленного по оси z , и область распространения струй-источников, втекающих через боковую поверхность приемной части. Иначе говоря, допустим, что при входе струй жидкости внутрь приемной части скважины их частицы на некотором расстоянии от стенки мгновенно смешиваются с основным потоком и скорость на выходе из фиксированного объема вследствие присоединения дополнительных частиц жидкости будет равна $v + \Delta v$. Обозначим массу присое-

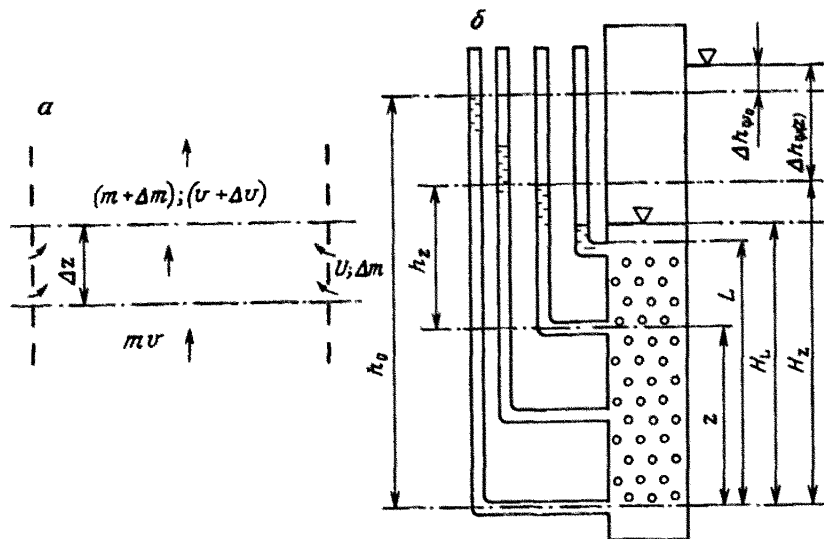


Рис. 11. 2. Схема изменения количества движения (а) и пьезометрических напоров (б) при отборе жидкости из скважины:

h_0 и h_z — пьезометрический напор соответственно в начальном сечении и сечении z ($h_0 = p_0/\gamma$ и $h_z = p_z/\gamma$)

движимых частиц Δm , а проекцию их скорости на ось z как $u \cos \beta$. Тогда в момент присоединения частиц к массе основного потока количество движения равно $(m v + \Delta m \cdot u \cos \beta)$, а на выходе из выделенного объема в момент $(t + \Delta t)$ количество движения равно $(m + \Delta m) (v + \Delta v)$.

Как известно, изменение количества движения за время Δt равно импульсу силы:

$$(m + \Delta m) (v + \Delta v) - (m v + \Delta m u \cos \beta) = \Sigma F_z \Delta t, \quad (11.3)$$

где ΣF_z — сумма проекций на ось Oz сил, приложенных к выделенному объему.

Пренебрегая величинами высшего порядка малости и переходя к пределам при $\Delta t \rightarrow 0$, получим

$$M dv - (u \cos \beta - v) dM = \Sigma F_z, \quad (11.4)$$

где M — секундная масса, или массовый расход.

Так как при отборе жидкости из скважины вектор скорости присоединяемых частиц можно считать направленным перпендикулярно к направлению движения основного потока [8, 18, 30], $u \cos \beta = 0$ и, следовательно, уравнение (11.4) запишется в виде

$$M dv + v dM = \Sigma F_z. \quad (11.5)$$

Выражая величину секундной массы через среднюю скорость потока $M = \frac{\gamma_{ж} W}{g} v$ и подставляя это значение в (II.5), получим

$$\frac{\gamma_{ж} W}{g} dv^2 - \Sigma F_z = 0. \quad (II. 6)$$

Рассмотрим силы, действующие на выделенный фиксированный объем. Для турбулентного движения в приемной части скважины характерны соударения присоединяемых частиц с частицами основного потока, торможение основного потока при набегании его на входящие струи и интенсивное перемешивание жидкости по всему объему.

Несмотря на различие в природе удара и перемешивания жидкости, результирующий эффект этих явлений один и тот же — обмен количеством движения между частицами и превращение частиц кинетической энергии в теплоту и механическую энергию перестройки профиля скоростей. Разница заключается лишь в том, что обмен количеством движения при макроскопическом и молекулярном смешиваниях происходит в направлении, перпендикулярном к направлению относительной скорости соприкасающихся частиц, а при ударе — в направлении относительной скорости. В условиях турбулентного потока, т.е. крайне иррегулярного течения, направления передачи количества движения при ударе и перемешивании неизбежно будут совпадать в целом ряде точек потока и, следовательно, указанная разница с точки зрения объединения удара и перемешивания в одну группу явлений несущественна, тем более что касательные напряжения, возникающие при макроскопическом обмене, и сила сопротивления при ударе пропорциональны квадрату скорости.

Эффект набегания основного потока на входящие струи можно уподобить эффекту влияния элементов шероховатости [32], когда бугорки шероховатости выходят за пределы вязкого подслоя и величина сопротивления при отрывном обтекании бугорков пропорциональна скоростному напору движущихся частиц.

Таким образом, учитывая, что при турбулентном режиме течения величина касательного напряжения пропорциональна квадрату усредненной скорости, а сопротивление при ударе и набегании входящих струй — квадрату скорости движущихся частиц, силы, приложенные к соответствующим поверхностям выделенного объема, можно представить суммой сил турбулентного трения и гидродинамического давления в виде

$$F_{r, p} = - \lambda_0 \rho \frac{v^2}{8} \pi D dz - W dp, \quad (II. 7)$$

где $\pi D dz$ — условная поверхность трения.

Из массовых сил следует учесть дополнительно только силу тяжести, так как силы инерции, возникающие в результате изменения направления

и величин мгновенных скоростей, учтены в обобщенной форме первым слагаемым уравнения (II. 6).

Представляя силу тяжести в виде

$$F_g = -\gamma_{ж} W dz \quad (II. 8)$$

и подставляя выражения (II. 7) и (II. 8) в уравнение (II. 6), окончательно будем иметь [15]

$$\frac{\alpha_{н.р} dv_z^2}{g} + d\left(\frac{p}{\gamma_{ж}} + z\right) + \lambda_0 \frac{v_z^2}{2gD} dz = 0. \quad (II. 9)$$

Уравнение (II. 9) является основным дифференциальным уравнением установившегося течения жидкости в приемной части вертикальной водо-заборной скважины. Оно справедливо для скважин с любой степенью вскрытия пласта и при любом распределении интенсивности бокового притока, так как при выводе уравнения на интенсивность притока по длине какие-либо ограничения не накладывались. Сравнение уравнения (II. 9) с уравнением Т.Г. Войнич-Сяножницкого [9] при $\beta = 90^\circ$ и $\alpha_{н.р} = \text{const}$ по длине свидетельствует об их аналогичности.

Как показали результаты обработки эпюр скоростей при истечении жидкости через перфорированные трубы, коэффициент $\alpha_{н.р}$ незначительно меняется по их длине и в инженерных расчетах может быть принят равным единице [8, 10]. Экспериментальные исследования также показали, что даже при достаточно больших расстояниях между отверстиями поправка на прерывистость раздачи (отбора) воды незначительна [34].

Интегрируя уравнение (II. 9) в пределах от 0 до z и принимая среднюю скорость потока в начальном сечении равной нулю, получим выражение для потери потенциального напора внутри приемной части в любом ее сечении:

$$\Delta h_z = \frac{v_z^2}{g} + \frac{1}{2gD} \int_0^z \lambda_0 v_z^2 dz, \quad (II. 10)$$

где v_z^2/g — потеря напора Δh_v , обусловленная изменением средней скорости потока вследствие присоединения частиц жидкости;

$(1/2gD) \int_0^z \lambda_0 v_z^2 dz$ — потеря напора Δh_λ , обусловленная турбулентным трением.

Интегрируя (II. 9) от z до L , найдем зависимость между напором и средней скоростью потока внутри скважины по длине ее приемной части:

$$H_z = H_L + \frac{v_L^2 - v_z^2}{g} + \frac{1}{2gD} \int_z^L \lambda_0 v_z^2 dz, \quad (II. 11)$$

где $H_z = \left(\frac{p}{\gamma} + z \right)$ и H_L — соответственно усредненные потенциальные напоры в произвольном z и выходном L сечениях.

Как следует из выражения (II. 11), при отборе жидкости из скважины потенциальный напор внутри приемной части является величиной переменной по ее длине даже в идеальном случае, когда потери напора на турбулентное трение принимаются равными нулю.

В соответствии с принципом непрерывности давления напоры у наружной стенки приемной части скважины и внутри нее будут различаться на величину потерь, обусловленных прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра, т.е.

$$H_{0z} = H_z + \Delta h_{\psi(z)}. \quad (\text{II. 12})$$

Потери напора Δh_{ψ} можно найти с помощью очевидной зависимости для приращения притока вдоль длины фильтра

$$dQ = \pi D \psi \sqrt{2g \Delta h_{\psi(z)}} dz, \quad (\text{II. 13})$$

где $\psi \sqrt{2g \Delta h_{\psi(z)}} = |u_r(z)|$ — среднее по периметру приемной части абсолютное значение радиальной скорости присоединяющихся частиц жидкости в сечении z ; ψ — обобщенный коэффициент истечения жидкости (для перфорированных труб, помещенных в воду, $\psi = \mu \eta$). Отсюда

$$\Delta h_{\psi(z)} = \frac{1}{2g (\pi D \psi_z)^2} \left(\frac{dQ}{dz} \right)^2. \quad (\text{II. 14})$$

Используя приведенное выражение и переходя от расхода к средней скорости потока, из (II. 12) с учетом (II. 11) получим зависимость между потенциальными напорами внутри приемной части и у наружной ее стенки:

$$\begin{aligned} H_{0z} = H_L + \frac{v_L^2 - v_z^2}{g} + \frac{1}{2gD} \int_z^L \lambda_0 v_z^2 dz + \\ + \frac{D^2}{32g \psi^2(z)} \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{II. 15})$$

или, переходя к понижениям уровня,

$$\begin{aligned} S_{0z} = S_L - \frac{v_L^2 - v_z^2}{g} - \frac{1}{2gD} \int_z^L \lambda_0 v_z^2 dz - \\ - \frac{D}{32g \psi^2(z)} \left(\frac{dv}{dz} \right)^2, \end{aligned} \quad (\text{II. 16})$$

где S_L — понижение уровня в выходном сечении приемной части.

Следует отметить принципиальную трудность строгого описания обычными уравнениями гидродинамики любых течений потока с переменным вдоль пути движения расходом (переменной массой). Это вытекает из рассмотрения уравнения Ньютона и уравнения движения потока с переменной массой, которое на основании выражения (II. 3) можно представить в векторной форме в виде, аналогичном уравнению И.В. Мещерского:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_i + (\vec{u} - \vec{v}) \frac{dm}{dt}. \quad (\text{II. 17})$$

Согласно (II. 17) уравнения гидродинамики и, в частности, уравнения Навье — Стокса и Рейнольдса, основанные на втором законе Ньютона, справедливы для течения жидкости с переменным расходом лишь в случае присоединения (отделения) дополнительных масс с относительной их скоростью, равной нулю, т.е. при равенстве модулей и коллинеарности векторов скорости присоединяемых (отделяемых) частиц жидкости и частиц основного потока по всей длине сборника или распределителя. Для данного случая (II. 17) принимает вид

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_i.$$

Кроме того, непосредственное использование уравнений Навье — Стокса или Рейнольдса возможно при присоединении (отделении) дополнительных масс жидкости под углом $\beta = 90^\circ$ к основному потоку. Тогда компоненты векторов по направлению движения основного потока также запишутся в виде второго закона Ньютона:

$$\frac{d(mv_z)}{dt} = \sum F_z.$$

В других случаях проекции вектора скорости присоединяемых (отделяемых) масс на любую из координатных осей не равны нулю и необходим учет сил инерции этих дополнительных масс.

§ 3. НАПОР У НАРУЖНОЙ СТЕНКИ СКВАЖИНЫ

Рассмотрим распределение напора у наружной стенки несовершенной скважины для напорной не ограниченной в плане многослойной толщи, которая представлена n гидравлически связанными слоями, однородными по горизонтали. К этому случаю могут быть приведены многие реальные пласты с произвольным распределением проницаемости по разрезу с помощью операции усреднения и представления фактической кривой $k = f(z)$ в виде ломаной.

Понижение уровня в многослойной толще описывается системой из $2n$ уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k_{i,j} \frac{\partial s_{i,j}}{\partial r} \right) + \frac{k_{i,j}}{r} \frac{\partial s_{i,j}}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{i,j} \frac{\partial s_{i,j}}{\partial z} \right) = \eta^* \frac{\partial s_{i,j}}{\partial t}; \quad (\text{II. 18})$$

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, n && \text{при } r_0 \leq r < \infty; \\ j &= 1 && \text{при } r > r_n; \\ s &= 2 && \text{при } r_0 \leq r \leq r_n. \end{aligned}$$

где $s_{i,j}$, $k_{i,j}$, $\eta_{i,j}^*$ — соответственно понижение уровня, коэффициенты фильтрации и упругоёмкости, относящиеся к i -му слою с номером j ; z — расстояние от подошвы пласта; t — время с начала откачки; n — число слоев неоднородной толщи.

Для нахождения понижения уровня у наружной стенки скважины при заданном дебите необходимо решить систему (II. 18) при следующих условиях.

На границах слоев

$$s_{i,j} |_{z=z_j} = s_{i+1,j} |_{z=z_j}, \quad (\text{II. 19})$$

$$k_{i,j} \frac{\partial s_{i,j}}{\partial z} |_{z=z_{j-0}} = k_{i+1,j} \frac{\partial s_{i+1,j}}{\partial z} |_{z=z_{j+0}}, \quad (\text{II. 20})$$

где z_j — расстояние от подошвы многослойной толщи до кровли i -го слоя; $i = 1, 2, \dots, n-1$; $j = 1, 2$.

На подошве и кровле пласта

$$\frac{\partial s_{1,j}}{\partial z} |_{z=0} = 0 \quad (\text{II. 21})$$

$$\text{и } \frac{\partial s_{n,j}}{\partial z} |_{z=m+0} = 0. \quad (\text{II. 22})$$

На границе призабойной зоны с пластом

$$s_{i,1} |_{r=r_n} = s_{i,2} |_{r=r_n}, \quad (\text{II. 23})$$

$$k_{i,1} \frac{\partial s_{i,1}}{\partial r} \Big|_{r=r_{n+0}} = k \frac{\partial s_{i,2}}{\partial z} \Big|_{r=r_{n-0}}, \quad (II. 24)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

У наружной стенки скважины

$$2\pi k_{i,2} r \frac{\partial s_{i,2}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \begin{cases} -\frac{\partial Q}{\partial z} & \text{при } 0 \leq z \leq L; \\ 0 & \text{при } L < z \leq m, \end{cases} \quad (II. 25)$$

где 0 и L — нижняя и верхняя ординаты приемной части скважины, отсчитываемые от подошвы пласта; $\partial Q_z(r_0)/\partial z$ — интенсивность притока жидкости в приемную часть скважины в сечении z ; Q_z — суммарный расход, фиксируемый в приемной части скважины в сечении z ; m — суммарная мощность неоднородной толщи.

$$\begin{aligned} \text{При } t = 0 \quad S_{i,j} &= 0, \\ \text{при } r \rightarrow \infty \quad S_{i,1} &= 0. \end{aligned} \quad (II. 26)$$

Внутри приемной части скважины должны соблюдаться законы истечения жидкости через приемную поверхность фильтра (II. 13) и распределения напора внутри нее (II. 11).

Точное аналитическое решение задачи фильтрации жидкости к несовершенной скважине в слоистой толще с приведенными граничными условиями наталкивается на ряд трудностей математического порядка.

Поэтому для решения задачи применим метод фрагментирования области фильтрации. Сущность метода заключается в разделении области фильтрации на фрагменты-зоны исходя из особенностей фильтрации жидкости в каждой из зон по деформациям потока и виду движения в выбранный момент времени, в интегрировании системы исходных уравнений, решении полученных дифференциальных уравнений зон относительно функции $\Phi = \int k S dz$ и последующего дифференцирования полученных решений для определения понижения уровня (напора) в пределах зоны в любом сечении z . Подобный прием позволяет сократить число исходных уравнений и ввести некоторые из граничных условий непосредственно в основное дифференциальное уравнение зоны, что облегчает его решение.

Понижение уровня (напора) у наружной стенки скважины S_{0z} в любом из сечений z находится суммированием понижений всех выделенных зон в том же сечении. В каждой зоне значение коэффициента фильтрации пород не должно существенно меняться вдоль координаты r .

При составлении дифференциальных уравнений зон понижение уровня

(напора) в наиболее удаленной от скважины зоне считается относительно статического уровня. В остальных зонах понижение уровня рассматривается относительно напора на границе раздела рассматриваемой и соседней, более удаленной зоны. Таким образом, на внешней границе каждой из рассматриваемых зон выполняется условие $S_i = 0$. Граничными поверхностями выделенных внутренних зон являются цилиндрические поверхности. Следовательно, при решении дифференциальных уравнений этих зон их внутренняя поверхность может быть принята за поверхность укрупненной скважины, на которой задается распределение интенсивности притока, а внешняя — за поверхность питания с приведенным понижением $S_i = 0$. Это дает возможность с некоторого момента времени от начала возмущения пласта (квазиустановившаяся фильтрация) свести нестационарный процесс фильтрации во внутренних зонах к стационарным условиям и существенно упростить решение задачи, так как для внутренних зон частные решения могут быть выражены через функции переменных r и z ввиду постоянства во времени разности напоров между любыми точками этих зон. Для внешней (наиболее удаленной от скважины) зоны, в которой процесс неустановившейся фильтрации находится в начальной стадии, можно получить простое решение для усредненного по вертикали понижения.

В соответствии с этим были проанализированы результаты работ М. Маскета, И.А. Чарного, В.М. Шестакова и проведены экспериментальные исследования на электрической модели системы пласт — скважина, позволяющей имитировать процесс движения жидкости к несовершенной скважине с учетом ее гидравлического сопротивления.

Анализ модельных данных распределения напора в пласте показал, что движение потока от радиуса питания до расстояния, равного $0,8 - 1$ мощности пласта, близко к плоско-радиальному. Ощутимая деформация потока начинает проявляться с расстояния, равного половине мощности пласта. Причем существенная деформация отмечается лишь вблизи скважины, где дополнительные потери напора составляют $80 - 90\%$ от общих потерь вследствие несовершенства скважины по степени вскрытия. Протяженность зоны деформации является функцией вскрытия пласта, отношения его мощности к радиусу скважины и радиуса питания к мощности пласта. Преобладающее влияние оказывает степень вскрытия пласта, гораздо меньшее — отношение мощности к радиусу скважины, а влияние последнего фактора практически несущественно. В призабойном пространстве отмечается дополнительная зона деформации в результате изменения проницаемости пород вследствие бурения и в процессе эксплуатации.

Учитывая изложенное выше, при решении поставленной задачи используем метод фрагментирования с делением области фильтрации на три зоны: незначительной деформации потока ($\epsilon m \leq r \leq \infty$), где $\epsilon < 1$ — эмпирический коэффициент; существенной деформации пластового

потока ($r_n \leq r < \epsilon m$) и деформации потока в призабойном пространстве ($r_0^n \leq r < r_n$). Кроме того, примем, что напоры слоев многослойной толщи в естественном залегании близки между собой, а сами слои разной проницаемости образуют единый комплекс с тесной гидравлической связью. Коэффициенты фильтрации и упругоёмкости пласта в каждом слое постоянны по координате r и меняются скачкообразно лишь в призабойной зоне.

С целью облегчения решения задачи уменьшим число уравнений и введем некоторые граничные условия в дифференциальные уравнения фильтрации. Для этого проинтегрируем уравнение (II. 18) от 0 до z , считая, что коэффициент фильтрации меняется по оси z произвольным образом (наиболее общий случай), а точка z лежит последовательно в первом, втором, третьем. . . и n -м слое. Складывая результаты интегрирования и учитывая граничные условия (II. 20) и (II. 21), вместо системы (II. 18) получим дифференциальное уравнение, справедливое для любой из зон при любом числе слоев неоднородной толщи:

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_j}{\partial r} + k \frac{\partial S_j}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = \frac{\partial \psi_j}{\partial t}, \quad (\text{II. 27})$$

где $\Phi_j = \int_0^z k S_j dz$ — функция переменных r и z ; $k \frac{\partial S_j}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = u_j \Big|_{z=z_0}$ — вертикальная составляющая скорости движения частиц жидкости в рассматриваемом сечении z_0 ; $\psi = \int_0^z \eta^* S dz$; $j = 1, 2, 3$.

В частности, для первой зоны ($\epsilon m \leq r \leq \infty$) уравнение (II. 27) примет вид

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_1}{\partial r} + k \frac{\partial S_1}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = \frac{\partial \psi_1}{\partial t}, \quad (\text{II. 28})$$

где $\Phi_1(r, z, t) = \int_0^z k S_1 dz$; $k \frac{\partial S_1}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = u_1 \Big|_{z=z_0}$ — вертикальная составляющая скорости движения частиц жидкости в первой зоне в рассматриваемом сечении z_0 ; z_0 — ордината рассматриваемой точки; $S_1(r, z, t)$ — фактическое понижение уровня в первой зоне; $\psi_1 = \int_0^z \eta^* S_1 dz$.

Во второй зоне ($r_n \leq r \leq \epsilon m$) согласно (II. 27) при квазиустановившемся движении справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} + k \frac{\partial S_2}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 0, \quad (\text{II. 29})$$

где $\Phi_2(r, z) = \int_0^z k S_2 dz$; $k \frac{\partial S_2}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = u_2 \Big|_{z=z_0}$ — вертикальная составляющая скорости движения частиц жидкости во второй зоне в рассматри-

ваемом сечении z_0 ; $S_2(r, z) = [S_2^*(r, z) - S_1(\epsilon m, z)]$ — понижение уровня во второй зоне в сечении z_0 относительно напора в том же сечении при $r = \epsilon m$ (приведенное понижение); $S_2^*(r, z)$ — фактическое понижение уровня во второй зоне в сечении z_0 ; $\hat{S}_1(\epsilon m, z)$ — фактическое понижение уровня в сечении z_0 на расстоянии $r = \epsilon m$ (граница раздела первой и второй зон).

Для третьей зоны ($r_0 \leq r < r_n$) уравнение фильтрации имеет вид, аналогичный (II. 29). Приведенное понижение уровня $S_3(r, z)$ в этой зоне в рассматриваемом сечении z_0 рассчитывается относительно напора в том же сечении при $r = r_n$.

Общее решение для понижения уровня воды у наружной стенки приемной части скважины в любом рассматриваемом сечении z_0 при постоянной величине отбора жидкости будем искать в виде суммы частных решений зон:

$$S(r, z) = S_1(\epsilon m, z, t) + S_2(r_n, z) + S_3(r_0, z).$$

В связи с трудностью получения простого аналитического решения уравнений (II. 28), (II. 29) при принятых исходных граничных условиях (II. 23) — (II. 26) и переменном напоре у наружной стенки скважины была построена серия зависимостей $\Phi = f(r, z)$, $\Phi_1 = f_1(r, z)$ и $\Phi_2 = f_2(r, z)$ для выявления общих закономерностей распределения функции Φ по координатам r и z . В качестве исходного материала использовались данные опытов на электрической модели системы пласт — скважина, имитирующей движение жидкости в трехслойной среде, и результаты подсчета по аналитическим зависимостям, полученным И.А. Чарным [40] и Н.Н. Веригиным [14] для однородной среды:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{2}{\pi^2 m r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \pi n m \cos \pi n z K_0(\pi n r)}{n^2 K_1(\pi n r_0)} \right] \quad (\text{II. 30})$$

$$\text{и } S = \frac{Q}{4\pi km} \left[-E_i \left(\frac{r^2}{4as} \right) + \frac{4}{\pi m} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \pi n m \cos \pi n z}{n} K_0(\pi n r) \right],$$

где K_0 и K_1 — модифицированные функции Бесселя.

Анализ экспериментальных данных и результатов подсчета по аналитическим зависимостям показал, что независимо от ординаты z все графики $\Phi = f(r, z)$ представляются серией прямых $\Phi_j = A(z)_j + B(z)_j$, разброс точек относительно которых чрезвычайно незначителен (рис. II. 3, II. 4). Следовательно, приближенное решение уравнений для первой и второй зон в любом сечении z можно представить в виде линейной функции от логарифма r с коэффициентами, зависящими от z , а общее решение — в виде суммы фактических и приведенных понижений.

В гидродинамическом отношении данная форма представления решения означает замену реального потока в зоне его незначительной дефор-

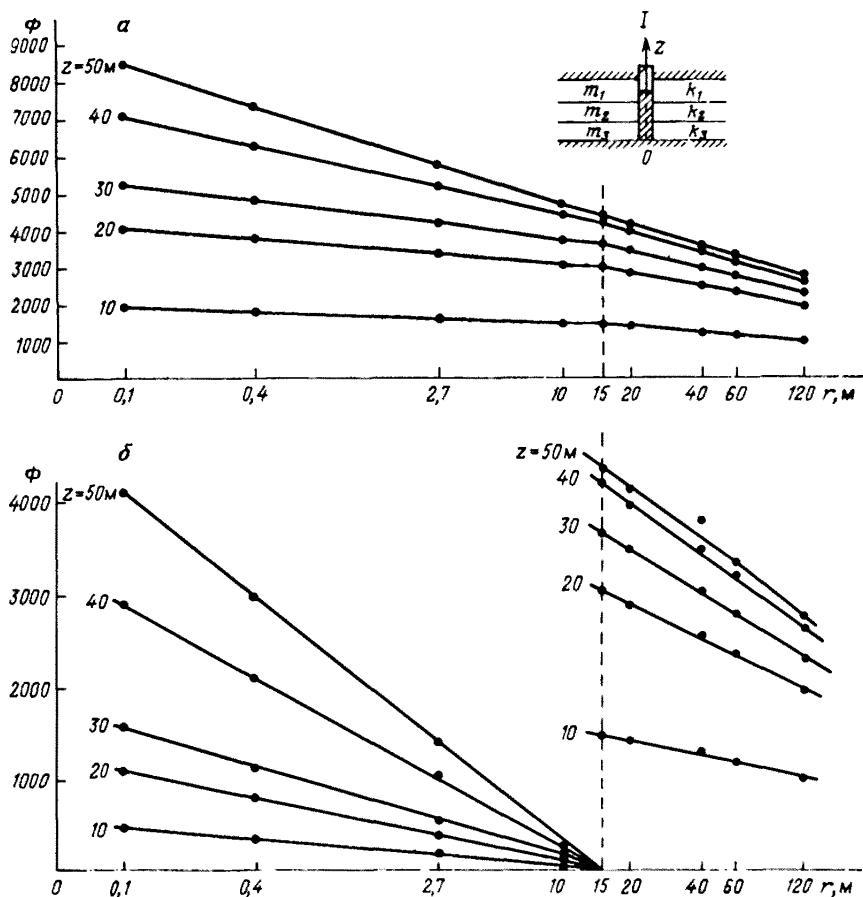


Рис. 11.3. Графики распределения интегрального (а) и приведенного интегрального (б) потенциалов в пласте:

условия эксперимента: $m = 60 \text{ м}$; $\bar{m}_n = 0,83$; $R_K = 3000 \text{ м}$, l — схема вскрытия пласта

мации условно плоско-радиальным потоком, а в зоне существенной деформации — послойно-радиальным с интенсивностью притока, постоянной вдоль радиуса r и переменной по координате z .

Подобный прием эквивалентен решению задачи притока жидкости в несовершенную скважину путем представления изотропной области фильтрации в виде модели двух неоднородно-анизотропных зон при постоянном значении коэффициента анизотропии по разрезу. В дальней от скважины зоне принимается предпосылка о стремлении коэффициента фильтрации пород к бесконечности в направлении, перпендикулярном

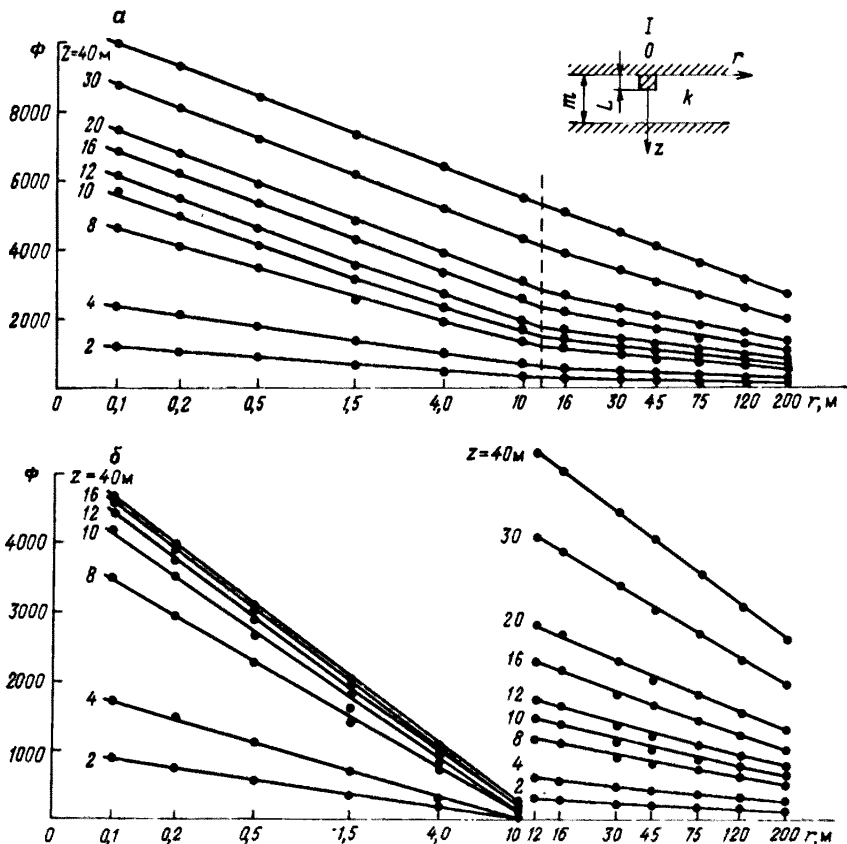


Рис. 11. 4. Графики распределения интегрального (а) и приведенного интегрального (б) потенциалов в пласте:

расчетные условия: $m = 40$ м; $\bar{m}_K = 0,25$; $R_K = 3000$ м; $L = 10$ м; $k = 300$ м/сут;
 I — схема вскрытия пласта

к напластованию слоев, а в ближней — предпосылка о равенстве того же коэффициента нулю. Полученное приближенное решение для понижения уровня у наружной стенки скважины будет совпадать с точным при соответствующем выборе размеров зон.

Например, решение И.А. Чарного для несовершенной скважины в однородно-анизотропном пласте при любом распределении притока вдоль ее приемной части имеет вид

$$S(r, z) = \frac{q_0}{2\pi k} \ln \frac{R}{r} - \frac{\kappa m}{2\pi^2 k r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F\left(\frac{\pi n r}{\kappa m}\right)}{n F'\left(\frac{\pi n r_0}{\kappa m}\right)} q_n \cos \frac{\pi n z}{m}, \quad (11.31)$$

$$\text{где } F\left(\frac{\pi nr}{\kappa m}\right) = I_0\left(\frac{\pi nr}{\kappa m}\right) K_0\left(\frac{\pi nR}{\kappa m}\right) - I_0\left(\frac{\pi nR}{\kappa m}\right) K_0\left(\frac{\pi nr}{\kappa m}\right);$$

$$F' = \left(\frac{\pi nr_0}{\kappa m}\right) = I_1\left(\frac{\pi nr_0}{\kappa m}\right) K_0\left(\frac{\pi nR}{\kappa m}\right) + I_0\left(\frac{\pi nR}{\kappa m}\right) K_1\left(\frac{\pi nr_0}{\kappa m}\right);$$

$$q_0 = \frac{1}{m} \int_0^m q(z) dz; \quad q_n = \frac{2}{m} \int_0^m q(z) \cos \frac{\pi nz}{m} dz, \quad q(z) = q_0 +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cos \frac{\pi nz}{m};$$

I_0, I_1, K_0 и K_1 — модифицированные функции Бесселя; $\kappa = \sqrt{k/k_{\perp}}$ — коэффициент анизотропии; k — коэффициент фильтрации пород в направлении, параллельном пласту; k_{\perp} — коэффициент фильтрации пород в направлении, перпендикулярном к пласту (в направлении оси z).

Рассмотрим два предельных случая при конечных значениях коэффициента фильтрации пород по горизонтали k . При $k_{\perp} \rightarrow \infty$ и равномерной интенсивности притока вдоль приемной части выражение (II. 31) принимает вид [40]

$$S(r, z) = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r_0},$$

т.е. превращается в формулу Дюпюи для плоско-радиального притока к скважине с длиной приемной части, равной мощности пласта, и коэффициентом сопротивления $\xi_1|_{k_{\perp} \rightarrow \infty} = 0$, обусловленным неполнотой вскрытия пласта.

При $k_{\perp} \rightarrow 0$

$$S(r_0, z) = \frac{Q}{2\pi kL} \ln \frac{R}{r_0} \quad \text{или} \quad S(r_0, z) = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{R}{r_0} + \frac{1-\bar{m}}{\bar{m}} \ln \frac{R}{r_0} \right),$$

т.е. формула (II. 31) обращается в формулу Дюпюи для плоско-радиального притока к совершенной скважине в пласте мощностью L , равной длине фильтра. При этом

$$\xi_1|_{k_{\perp} \rightarrow 0} = \frac{1-\bar{m}}{\bar{m}} \ln \frac{R}{r_0}.$$

Согласно (II. 31) в однородной среде при равномерной интенсивности притока вдоль приемной части скважины и $R \gg m$

$$S(r_0, z) = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{R}{r_0} + \xi_1 \right),$$

$$\text{где } \xi_1 = \frac{2}{\pi^2 \bar{m} \bar{r}_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \pi n \bar{m} \cos \pi n z}{n^2} \frac{K_0(\pi n \bar{r}_0)}{K_1(\pi n \bar{r}_0)};$$

$$\bar{r}_0 = \frac{r_0}{m} \text{ и } \bar{m} = \frac{L}{m}.$$

Сравнение приведенных выше значений $\xi_1|_{k_{\perp} \rightarrow \infty}$, $\xi_1|_{k_{\perp} \rightarrow 0}$ и ξ_1 показывает, что при притоке жидкости к несовершенной скважине в изотропной среде точное значение коэффициента дополнительного сопротивления вследствие неполного вскрытия пласта ξ_1 находится между соответствующими значениями для предельных случаев анизотропии: $\xi_1|_{k_{\perp} \rightarrow \infty} < \xi_1 < \xi_1|_{k_{\perp} \rightarrow 0}$.

Таким образом, применяя искусственный прием представления практически изотропной среды в виде анизотропных зон с разными предельными значениями коэффициента фильтрации пород в направлении, перпендикулярном к напластованию слоев, можно получить приближенное решение для понижения уровня у наружной стенки скважины, которое совпадает с точным при соответствующем выборе размеров зон. Допустимость подобного приема для неоднородного пласта следует из однотипности зависимостей $\Phi = f(r, z)$ в случае однородной и слоистой толщи (см. рис. II. 4, II. 5) и приближенного равенства в обоих случаях среднеинтегрального понижения уровня вне приемной части скважины (филтра) при $r = r_0$ среднеинтегральному понижению уровня на границе раздела первой и второй зон, т.е. (см. рис. II. 1)

$$\bar{S}|_{r=r_0, L < z \leq m} = \bar{S}|_{r=\epsilon m, 0 \leq z \leq m}$$

$$\text{где } \bar{S}|_{r=r_0, L < z \leq m} = \frac{1}{m-L} \int_L^m S dz \text{ и } S|_{r=\epsilon m} = \frac{1}{m} \int_0^m S dz.$$

Приемлемость принятых методов фрагментирования и эквивалентных сопротивлений может быть доказана сопоставлением результатов вычислений по полученному приближенному решению с известными решениями гидромеханики и данными экспериментов.

Исходя из изложенного выше и считая, что в первой зоне ($\epsilon m \leq r \leq \infty$) значение вертикальной составляющей скорости движения частиц жидкости $u_1|_{z=z_0}$ конечно при $k_{\perp} \rightarrow \infty$ и, следовательно, $\partial S_1 / \partial z \rightarrow 0$, а \tilde{k} и $\tilde{\eta}^*$ не зависят от r и t , перепишем уравнение (II. 28) при $z = m$ в виде

$$\tilde{k} \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_1}{\partial r} \right) = \tilde{\eta}^* \frac{\partial S_1}{\partial t},$$

где S_1 — понижение уровня (напора) относительно статического уровня;

$$\tilde{k} = \int_0^m k dz \text{ и } \tilde{\eta}^* = \int_0^m \eta^* dz.$$

Последнее выражение можно также записать в виде

$$\frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_1}{\partial r} = \frac{1}{\bar{a}} \frac{\partial S_1}{\partial t}, \quad (II.32)$$

где \bar{a} — обобщенный коэффициент пьезопроводности,

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (km)_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i^*}.$$

В приведенном равенстве $(km)_i$ — водопроводимость слоя; μ_i^* — коэффициент упругой водоотдачи слоя.

Уравнение (II. 32) решим при следующих исходных начальных и граничных условиях:

$$t = 0, S_1 = 0;$$

$$t > 0, 2\pi k r \frac{\partial S_1}{\partial r} \Big|_{r=\epsilon m} = - \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Big|_{r=\epsilon m};$$

$$t > 0, S_1 \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0;$$

которые после интегрирования примут вид

$$t = 0, S_1 = 0; \quad (II. 33)$$

$$t > 0, 2\pi \bar{k} m \frac{\partial S_1}{\partial r} \Big|_{r=\epsilon m} = - Q; \quad (II. 34)$$

$$t > 0, S_1 \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad (II. 35)$$

где $\bar{k} = \frac{1}{m} \int_0^m k dz$ — среднеинтегральное значение коэффициента фильтрации многослойной толщи; Q — расход воды из слоистой толщи, протекающий через внутреннюю границу первой зоны и принимаемый равным дебиту скважины.

Применим к уравнению (II. 32) и граничным условиям (II. 33) — (II. 35) преобразование Лапласа по переменной t . Выполнив ряд операций, идентичных приведенным в работе [7], получим обыкновенное дифференциальное уравнение, решение которого с учетом (II. 33) — (II. 35) следующее:

$$T = \frac{Q K_0 \left(r \sqrt{\frac{p}{s}} \right)}{2\pi k \epsilon m^2 p \sqrt{\frac{p}{s}} K_1 \left(\epsilon m \sqrt{\frac{p}{s}} \right)}, \quad (II. 36)$$

где K_0 и K_1 — функции Бесселя второго рода от мнимого аргумента.

Переходя от изображения T к оригиналу S , при больших значениях времени по аналогии с решением Г.Карслоу и Д. Егера получим

$$S_1 \approx \frac{Q}{4\pi k m} \left[\left(1 + \frac{1}{2f_0}\right) \ln \frac{2,25}{\bar{r}^2} f_0 + \frac{1}{4f_0} (1 + \bar{r}^2 + 2\ln \bar{r}) + \dots \right], \quad (II. 37)$$

где $f_0 = \bar{a} t / (\epsilon m)^2$ и $\bar{r} = r / (\epsilon m)$ при $r \geq \epsilon m$.

При $f_0 \geq 25$ для точек с координатой $r = \epsilon m$ выражение (II. 37) примет вид

$$S_1|_{r=\epsilon m} = \frac{Q}{2\pi k m} \ln \frac{1,5\sqrt{\bar{a}t}}{\epsilon m}$$

или, вводя условный радиус питания $R = 1,5\sqrt{\bar{a}t}$,

$$S_1|_{r=\epsilon m} = \frac{Q}{2\pi k m} \ln \frac{R}{\epsilon m}, \quad (II. 38)$$

где $S_1|_{r=\epsilon m}$ — понижение уровня на внутренней границе первой зоны.

При мощности многослойной толщи $m = 100$ м, $\epsilon m = 25$ м (протяженность зоны существенной деформации составляет около четверти мощности пласта) и $\bar{a} = 10^5$ м²/сут получим, что критерий $f_0 \geq 25$ для точки с координатой $r = \epsilon m$ удовлетворяет этому условию спустя 4 ч после начала откачки.

Для второй зоны ($r_n \leq r \leq \epsilon m$) при $k_1 \rightarrow 0$ на основании уравнения (II. 29) будем иметь

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi_2}{\partial r} \right) = 0$$

и, следовательно,

$$\Phi_2(r, z) = A_2(z) \ln r + B_2(z). \quad (II. 39)$$

Аналогично для призабойной зоны ($r_0 \leq r \leq r_n$)

$$\Phi_3(r, z) = \int_0^z k S_3 dz = A_3(z) \ln r + B_3(z), \quad (II. 40)$$

где $S_3(r, z) = \{S_3^*(r, z) - [S_2(r_n, z) + S_1(\epsilon m, z)]\}$ — понижение уровня в призабойной зоне в сечении z_0 относительно напора в том же сечении при $r = r_n$; $S_3^*(r, z)$ — фактическое понижение уровня в третьей зоне; $S_2(r_n, z)$ — понижение уровня в точках $r = r_n$ относительно напора при $r = \epsilon m$.

Функции $A_2(z)$, $B_2(z)$, $A_3(z)$ и $B_3(z)$ определим на основании граничных условий (II. 23) — (II. 25), которые после представления фактических величин понижения уровня в виде понижений относительно внешней границы зоны и интегрирования от 0 до z примут следующий вид:

на внешней границе второй зоны

$$\Phi_2|_{r=\epsilon m-0} \text{ и } 2\pi r \frac{\partial \Phi_2}{\partial r}|_{r=\epsilon m-0} = -Q;$$

на границе призабойной зоны

$$\Phi_3|_{r=r_n} = 0 \text{ и } \frac{\partial \Phi_2}{\partial r}|_{r=r_n-0} = \frac{\partial \Phi_3}{\partial r}|_{r=r_n+0};$$

на стенке скважины

$$2\pi r \frac{\partial \Phi_3}{\partial r}|_{r=r_0} = -Q_{z_0}|_{r=r_0} \text{ и } 2\pi r \frac{\partial \Phi_3}{\partial r}|_{r=r_0} = -Q,$$

где $Q_{z_0}|_{r=r_0}$ — суммарный расход, фиксируемый в приемной части скважины в рассматриваемом сечении z_0 ; Q — дебит скважины.

После подстановки найденных значений $A_2(z)$, $B_2(z)$, $A_3(z)$ и $B_3(z)$ в (II. 39) и (II. 40) будем иметь

$$\Phi_2 = \frac{Q_{z_0}|_{r=r_0}}{2\pi} \ln \frac{\epsilon m}{r} \text{ при } r_n \leq r \leq \epsilon m$$

$$\text{и } \Phi_3 = \frac{Q_{z_0}|_{r=r_0}}{2\pi} \ln \frac{r_n}{r_0} \text{ при } r_0 \leq r \leq r_n.$$

Дифференцируя по z , окончательно получим при $r = r_n$ и $r = r_0$

$$S_2 = \frac{1}{2\pi k_z} \ln \frac{\epsilon m}{r_n} \frac{\partial Q_{z_0}}{\partial z}|_{r=r_0} \quad (II. 41)$$

$$\text{и } S_3 = \frac{1}{2\pi k_{nz}} \ln \frac{r_n}{r_0} - \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Big|_{r=r_0}, \quad (\text{II. 42})$$

где k_z и k_{nz} — средний коэффициент фильтрации элементарного слоя соответственно неоднородной толщи и призабойной зоны; $\frac{\partial Q}{\partial z} \Big|_{r=r_0}$ — интенсивность притока на внешней стенке скважины в сечении z .

Общее понижение уровня y наружной стенки скважины в произвольном сечении z при любом распределении притока вдоль ее приемной части (при выводе уравнений ограничения на характер распределения притока не вводились) найдем, суммируя выражения (II. 38), (II. 41) и (II. 42),

$$S_{0z} = \frac{1}{2\pi k_z} \left[\ln \frac{\epsilon m}{r_0} + \left(\frac{k_z}{k_{nz}} - 1 \right) \ln \frac{r_n}{r_0} \right] \frac{\partial Q_z}{\partial z} \Big|_{r=r_0} + \frac{Q}{2\pi k m} \ln \frac{1,5\sqrt{s}t}{\epsilon m}. \quad (\text{II. 43})$$

Зависимость (II. 43) справедлива как для совершенных, так и для несовершенных по степени вскрытия скважин с момента установления квазистационарного режима в точке $r = \epsilon m$.

В выражении (II. 43) первое слагаемое является величиной постоянной во времени и определяет потери напора в сравнительно малой по размеру зоне существенных деформаций потока, обусловленных скважиной; второе слагаемое — потери напора в удаленной зоне. Величина последних потерь напора является функцией внешних граничных условий, фильтрационных свойств пород, расхода скважины и не зависит от особенностей ее заложения и конструкции приемной части.

Аналогичный результат получим и для неоднородной изотропной среды с любым законом изменения коэффициента фильтрации пород по вертикали и постоянстве его значения по горизонтали. При этом для любого сечения z справедливо уравнение

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial s}{\partial z} \right) = \eta^* \frac{\partial s}{\partial t}.$$

Приближенное решение для понижения уровня y наружной стенки несовершенной скважины в любом сечении z при постоянном дебите скважины имеет вид, идентичный зависимости (II. 43), в которой величину обобщенного коэффициента пьезопроводности пород следует принимать

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^m k dz}{\int_0^m \eta^* dz}.$$

Используя основное положение метода фильтрационных сопротивлений [40, 42] об аддитивности внутреннего и внешнего сопротивлений области фильтрации, запишем выражение для понижения уровня воды у наружной поверхности приемной части несовершенной скважины в более общем виде:

$$S_{0z} = \frac{1}{2\pi k_z} (R^* + \xi_n) \frac{\partial \varphi_z}{\partial z} \Big|_{r=r_0} + \frac{\alpha}{2\pi km} R^{**}, \quad (II. 44)$$

где $R^* = \ln(\epsilon m)/r_0$; $\epsilon = f(m/r_0, L/m)$ зависит от степени вскрытия пласта и отношения его мощности к радиусу скважины; $\xi_n = \left(\frac{k_z}{k_{nz}} - 1 \right) \ln \frac{r_n}{r_0}$.

Расчетное значение R^{**} равно половине величины, определяемой по формулам или графикам, приведенным в работах [7, 14].

В случае кругового пласта с постоянным контуром питания $R^{**} = \ln \frac{R}{\epsilon m}$, для полуограниченного пласта с постоянным контуром питания $R^{**} = \ln \frac{2l}{\epsilon m}$, в неограниченном пласте $R^{**} = \ln \frac{1,5\sqrt{at}}{\epsilon m}$ и т.д.

На основании ранее выполненных исследований [7, 13] и практики опытно-фильтрационных работ, свидетельствующих об аналогичности структуры формул для понижения уровня в многослойной толще при наличии слабопроницаемых слоев, непроницаемых слоев и при тесной гидравлической связи между слоями, можно предположить, что зависимости (II. 43) и (II. 44) также справедливы и в случае многослойного пласта с "непроницаемыми" перемычками, если в качестве коэффициента пьезопроводности принять

$$\bar{\alpha} = \left[\prod_{j=1}^n \alpha_j(km)_j \right]^{1/km}.$$

В соответствии с зависимостями (II. 43) и (II. 44) выражение для напора у наружной стенки приемной части скважины можно записать следующим образом:

$$H_{0z} = H_k - S_{0z} = H_k - \frac{D^2}{8k_z} (R^* + \xi_n) \frac{\partial \varphi_z}{\partial z} \Big|_{r=r_0} - \frac{D^2 \bar{\alpha} L}{8km} R^{**}. \quad (II. 45)$$

§ 4. УРАВНЕНИЕ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ В ПРИЕМНУЮ ЧАСТЬ СКВАЖИНЫ

Считая распределение интенсивности притока на входе в приемную часть скважины и у ее внутренней стенки идентичными, выполним "сшивание", используя принцип непрерывности давления. Приравнявая выражения (II. 45) и (II. 15) и перегруппировав соответствующие члены, получим

$$\frac{D^2}{8k_z} (R^* + \xi_n) \frac{dv_z}{dz} + \frac{D^2}{32g \psi_z^2} \left(\frac{dv_z}{dz} \right)^2 - \frac{v_z^2}{g} + \frac{1}{2gD} \int_z^L \lambda_0 v_z^2 dz - (S_L - \frac{v_L^2}{g} - \frac{D^2 v_L}{8\bar{k}m} R^{**}) = 0, \quad (\text{II. 46})$$

где S_L — понижение уровня (напора) в выходном сечении приемной части.

Введем новые переменные:

$$\bar{v} = v_z/v_L \quad \text{и} \quad \bar{z} = z/L.$$

Тогда уравнение (II. 46) примет вид

$$\frac{A_1}{k_z} \bar{v}' + \frac{B_1}{\psi_z^2} (\bar{v}')^2 - E_1 \bar{v}^2 + F_1 \frac{1}{\bar{z}} \int_{\bar{z}}^1 \lambda_0 \bar{v}^2 d\bar{z} - G = 0, \quad (\text{II. 47})$$

$$\text{где } A_1 = \frac{gD^2}{8Lv_L} (R^* + \xi_n); \quad B_1 = \frac{D^2}{32L^2}; \quad E_1 = 0;$$

$$F_1 = \frac{L}{2D}; \quad G_1 = \frac{gS_L}{v_L^2} - 1 - \frac{gD^2}{8\bar{k}mv_L} R^{**};$$

\bar{v}' — первая производная средней относительной скорости потока по координате \bar{z} .

Выражение (II. 47) представляет собой интегродифференциальное уравнение притока жидкости в приемную часть скважины с учетом ее гидравлических сопротивлений. Оно справедливо для совершенных и несовершенных скважин, пробуренных в неоднородной толще с неравномерной перфорацией приемной части.

Из (II. 47) при $k_z = \text{const}$ и $\psi_z = \text{const}$ путем дифференцирования можно получить как частный случай уравнение, аналогичное по форме уравнениям С.Джерджа и И.М. Гершановича, но с существенной разницей в значениях коэффициентов при неизвестных, которая сказывается на конечном результате вычислений.

Решение нелинейного уравнения (II. 47) связано со значительными

трудностями как математического, так и физического характера. В частности, если для коэффициента гидравлического трения λ в глухих трубах определены влияющие факторы и получены полуэмпирические зависимости [3], то для коэффициента турбулентного трения λ_0 в перфорированных трубах подобной ясности не имеется, так как опубликованные результаты [3, 8, 10, 18, 19, 21, 27, 34, 45, 49] весьма противоречивы.

Причем расхождение мнений отмечается не только в оценке абсолютного значения коэффициента λ_0 , но и соотношения λ и λ_0 . Одни исследователи считают $\lambda > \lambda_0$, другие — $\lambda < \lambda_0$. Причина подобного несоответствия заключается в различии принятых методик обработки экспериментального материала вследствие априорных допущений о характере распределения средней скорости по длине перфорированной трубы.

Как показывает анализ экспериментальных и теоретических исследований, приведенных в работах [2, 9, 19, 21, 27], потери напора на трение, представляющие собой результирующий эффект обмена количеством движения и превращения механической энергии в тепловую, при турбулентном движении в трубе с проницаемой (перфорированной) стенкой имеют двойственную природу. Макроскопический обмен количеством движения по потоку возникает как в результате смещения масс, поступающих через отверстия в трубе, с массой основного потока, так и вследствие существенной деформации поля ее скоростей у неперфорированной стенки. Соотношения между потерями энергии на эти виды обмена зависят от интенсивности отбора (раздачи) жидкости, формы и количества отверстий и их взаимного расположения. Суммарный коэффициент турбулентного трения можно представить в следующем виде:

$$\lambda_0 = c\lambda + \lambda_m, \quad (\text{II. 48})$$

где c — постоянная, значение которой определяется из эксперимента; $\lambda_m = \varphi[u_{r_0}(z), \nu]$ — коэффициент турбулентного трения, характеризующий потери энергии вследствие смешения присоединяемых масс с основным потоком и переработки профиля скоростей; $u_{r_0}(z) = (D/4)(dv_z/dz)$ — среднее по периметру приемной части скважины абсолютное значение радиальной скорости присоединяемых частиц жидкости в сечении z .

Если отношение расстояния между отверстиями в приемной части скважины к их диаметру достаточно мало, то удельные потери напора на трение полностью определяются величиной λ_m . Проведенный автором анализ результатов экспериментальных исследований [8] показал, что практически для всех видов приемной поверхности водозаборных скважин $\lambda_0 \approx \lambda_m$ и лишь в случае перфорации приемной части малым количеством отверстий ($\eta < 3 - 5\%$) потери напора, обусловленные трением, определяются зависимостью (II. 48).

В связи с тем что диапазон ранее предложенных экспериментальных зависимостей $\lambda_m = \varphi[u_{r_0}(z), \nu]$ достаточно широк и трудно сделать

однозначный выбор, возникает необходимость в проведении дополнительных исследований.

В опубликованных материалах коэффициент трения представлен в виде зависимостей

$$\lambda_m = C_1 \sqrt{\frac{u}{v}}; \lambda_m = C_2 \frac{u}{v}; \lambda_m = C_3 \frac{u}{v} + C_4 \left(\frac{u}{v}\right)^2 \text{ и т.п.,}$$

где C_i — постоянная, имеющая различные значения у разных исследователей.

С целью определения вида зависимости $\lambda_m = \varphi[u_{r_0}(z), v]$ рассмотрим уравнение (II. 47). Учитывая возможность получения однозначного решения в случае перфорированной трубы, работающей в водной среде, и допустимость переноса полученного результата на скважину, пренебрежем первым слагаемым уравнения (II. 47) и продифференцируем его. В результате получим

$$\frac{2B}{\bar{\psi}^2 \bar{\psi}^2} \bar{v}' \bar{v}'' - \frac{2B}{\bar{\psi}^3 \bar{\psi}_L^2} \bar{\psi}' (\bar{v}')^2 - 2E \bar{v} \bar{v}' - F \lambda_m \bar{v}^2 = 0, \quad (\text{II. 49})$$

где $\bar{\psi} = \psi_z / \psi_L$ — относительный обобщенный коэффициент истечения жидкости.

Согласно экспериментальным исследованиям при равномерном распределении отверстий по длине трубы и в случае сбора воды $\psi = \text{const}$ уравнение (II. 49) примет вид

$$B_2 \bar{v}' \bar{v}'' - E_2 \bar{v} \bar{v}' - F_2 \lambda_m \bar{v}^2 = 0, \quad (\text{II. 50})$$

где \bar{v}'' — вторая производная средней скорости по координате z ;

$$B_2 = \frac{D^2}{16 \psi^2 L^2}; \quad E_2 = 2; \quad F_2 = \frac{L}{2D}.$$

Введем новую переменную и назовем ее интенсивностью массопритока:

$$\omega = v / u_{r_0}(z).$$

В безразмерном виде

$$\omega = \frac{4L}{D} \frac{\bar{v}}{\bar{v}'}. \quad (\text{II. 51})$$

Решая уравнение (II. 50) относительно λ_m и вводя значение ω по (II. 51), после элементарных преобразований получим

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2D}{L \psi^2 \omega^2} \frac{\bar{v}''}{\bar{v}'} - \frac{16}{\omega}. \quad (II. 52)$$

Согласно результатам экспериментальных исследований, выполненных на ЭЦВМ, гидравлической и электрической модели системы пласт — скважина независимо от типа функциональной зависимости $\lambda_m = \varphi[u_{r, \rho}(z), v]$ распределение средней скорости потока внутри перфорированной трубы, помещенной в воду, с высокой степенью точности описывается выражением $\bar{v} = \text{sh} \alpha \bar{z} / \text{sh} \alpha$.

Отсюда согласно (II. 51) и (II. 52)

$$\lambda_m = \frac{F}{\omega} = F \frac{D}{4L} \frac{\bar{v}'}{\bar{v}}, \quad (II. 53)$$

где F — величина, постоянная по длине приемной части и определяемая экспериментальным путем в лабораторных и натурных условиях ($F =$

$$= \frac{\alpha^2 D^2}{2 \psi^2 L^2} - 16).$$

Из выражения (II. 53) следует, что коэффициент турбулентного трения λ_m прямо пропорционален отношению средней радиальной скорости входа жидкости в перфорированную трубу к средней скорости потока внутри нее. Согласно (II. 53) коэффициент λ_m , а следовательно, и λ_0 в общем случае должен меняться по длине приемной части скважины, так как непрерывно возрастает осевая скорость и меняется соотношение между скоростями присоединяемых частиц и основного потока. При решении уравнения движения жидкости с переменным вдоль пути расходом эта особенность не позволяет применить в общем случае методы линеаризации нелинейного члена λv^2 подобно тому, как это делается в гидравлике трубопроводов [39].

Если для ламинарного и турбулентного течений в трубопроводах произведение λv^2 можно представить в виде $\lambda v^2 = a v$, где $a = \lambda v$ — постоянная (линеаризация имеет нулевую погрешность для ламинарного режима и представляет собой достаточно точное приближение для турбулентного режима в трубопроводах), то согласно (II. 53) при течении жидкости по перфорированным трубам и, в частности, в приемной части скважины

$$\lambda v^2 = \left(\frac{F D}{4} v' + c \lambda v \right) v.$$

Отсюда следует, что $\lambda v \approx \text{const}$ лишь в случае равномерного присоединения масс жидкости по длине приемной части, так как только тогда $v' = \text{const}$. В других случаях описанный прием линеаризации недопустим.

Выражение (II. 53) позволяет существенно упростить интегродифференциальное уравнение притока жидкости в приемную часть скважины.

При $\psi_z = \text{const}$ и подстановке (II. 53) в исходное уравнение (II. 47) последнее примет вид

$$Av' + B(\bar{v}')^2 - (E + F^*)\bar{v}^2 - G = 0, \quad (\text{II. 54})$$

где $A = \frac{gD^2}{8k_z L v_L} (R^* + \xi_n)$ — коэффициент, величина которого постоянна в пределах однородного слоя и переменна по мощности неоднородной толщ; $B = \frac{D^2}{32\psi^2 L^2}$; $E = 1$; $F^* = \frac{F}{16}$; $G = \frac{gS_L}{v_L^2} - (1 + F^*) - \frac{gD^2}{8kmv_L} R^{**}$.

$$B = \frac{D^2}{32\psi^2 L^2}; E = 1; F^* = \frac{F}{16}; G = \frac{gS_L}{v_L^2} - (1 + F^*) - \frac{gD^2}{8kmv_L} R^{**}.$$

Выражение (II. 54) представляет собой приведенное уравнение притока жидкости в приемную часть скважины с учетом ее гидравлических сопротивлений.

§ 5. ПОТЕРИ НАПОРА В КОЛОННАХ ОБСАДНЫХ ТРУБ И ГЛУХОЙ ЧАСТИ ФИЛЬТРА

Связь между потерями напора в трубопроводе круглого сечения, скоростью потока, длиной трубопровода и его диаметром выражается формулой Дарси — Вейсбаха:

$$\Delta h_T = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \text{или} \quad \Delta h_T = \frac{8Q^2 \lambda}{9\pi^2 D^5} L. \quad (\text{II. 55})$$

Для определения значения коэффициента гидравлического трения λ предложен ряд формул [3, 21, 41]. Наиболее обоснованной и общей является формула А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_3}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (\text{II. 56})$$

где k_3 — эквивалентная абсолютная шероховатость, среднее значение которой для разных материалов и способов изготовления труб приведено в таблицах [3]; d — диаметр трубы.

Однако, учитывая некоторую неопределенность в выборе конкретных значений k_3 по таблицам [3], для дальнейшего расчета потерь напора в неперфорированной части фильтра и обсадных колоннах используем эмпирические зависимости Ф.А. Шевелева.

В результате обширных экспериментальных исследований течения воды по стальным бесшовным трубам диаметром от 15,5 до 1200 мм

(1090 опытов) Ф.А. Шевелев получил следующие зависимости гидравлического уклона от средней скорости потока и внутреннего диаметра:

для новых труб

$$i = 0,000810 \frac{v^2}{d^{1,226}} \left(1 + \frac{0,684}{v}\right)^{0,226}; \quad (II. 57)$$

для старых труб

$$i = 0,000912 \frac{v^2}{d^{1,3}} \left(1 + \frac{0,867}{v}\right)^{0,3} \quad \text{при } v < 1,2 \text{ м/с}, \quad (II. 58)$$

$$i = 0,00107 v^2 / d^{1,3} \quad \text{при } v \geq 1,2 \text{ м/с}. \quad (II. 59)$$

К "новым", по Ф.А. Шевелеву, относятся трубы, на стенках которых нет заметных признаков коррозии или отложений; "старыми" считаются трубы с шероховатостью внутренних стенок, которая эквивалентна по гидравлическому сопротивлению искусственной шероховатости, образуемой нанесением на стенки "новых" труб песка с зернами крупностью 1 мм.

Анализ результатов исследований Ф.А. Шевелева, выполненный А.Д. Альтшулем, показал их высокую точность и полную согласованность как с обобщенными формулами распределения скоростей внутри трубы, так и с формулой для коэффициента гидравлического трения (II. 56) в переходной и квадратичной областях течения.

В соответствии с формулами (II. 58) и (II. 59) составлены таблицы для расчета потерь напора в трубопроводах [41] с шероховатыми стенками. В настоящее время нормами и техническими условиями проектирования водопроводов рекомендуется рассчитывать потери напора на трение при движении воды по трубопроводам по этим таблицам. Хотя составленные таблицы охватывают широкий диапазон расходов и диаметров, при пользовании ими могут быть допущены существенные ошибки как из-за несоответствия приводимых расчетных диаметров и применяемых в геологоразведочной практике обсадных труб, так и вследствие того, что на стадии опытно-фильтрационных разведочных работ обсадные трубы с гладкими стенками следует относить к категории "новых" труб, для расчета потерь напора в которых таблиц не имеется.

Исходя из изложенного, выше были проанализированы формулы (II. 57) — (II. 59) и рассмотрены возможности приведения их к виду, удобному для построения номограмм. Анализ показал, что при средних скоростях течения до 2 м/с зависимость гидравлического уклона от расхода воды для различных диаметров выражается уравнением типа $i = a \alpha^b$. Для отыскания численных значений коэффициентов обобщающих эмпирических формул применялся метод выравнивания, который заклю-

чался в преобразовании степенных функций $i = f(Q)$ и $a = \varphi(d)$ до соответствующих линейных функций. Выравнивание удалось достигнуть заменой переменных $1000i$, Q , a и d новыми переменными

$$X_1 = \lg 1000i, Y_1 = \lg Q \text{ и } X_2 = \lg a, Y_2 = \lg d.$$

Ввиду незначительного отклонения расчетных точек от соответствующих средних линий значения коэффициентов a и b определялись графоаналитическим способом исходя из уравнений прямых в логарифмической системе координат. Полученные аппроксимированные зависимости имеют следующий вид:

для "новых" труб

$$i = 30,9 Q^{1,88} / D^5; \quad (II. 60)$$

для "старых" труб

$$i = 51,3 Q^{1,85} / D^5, \quad (II. 61)$$

где Q — дебит скважины, л/с; D — внутренний диаметр трубы, см.

Отсюда потери напора в обсадных колоннах или неперфорированных частях фильтровых колонн могут быть выражены следующими эмпирическими зависимостями [15]:

для "новых" труб

$$\Delta h_{\tau} = 30,9 Q^{1,88} L / D^5, \quad (II. 62)$$

где L — длина труб, м;

для "старых" труб

$$\Delta h_{\tau} = 51,3 Q^{1,85} L / D^5. \quad (II. 63)$$

Несмотря на то что приведенные зависимости имеют размерные коэффициенты и дробные степени, эти недостатки искупаются их соответствием лабораторным и натурным экспериментам.

Зависимость (II. 62) можно использовать при расчете потерь напора в неперфорированной части фильтра и обсадных колоннах вновь пробуренных скважин (гладкие внутренние стенки). Зависимость (II. 63) можно применить при расчете потерь напора в скважинах, находящихся длительное время в эксплуатации. Погрешность расчетов по формулам вследствие аппроксимации составляет около 5 %.

В связи с тем что в расчетах скважин иногда используют выражение λ , полученное из формулы Ж.Дюпюи, рассмотрим разницу в значениях гидравлических уклонов, вычисленных по указанным формулам.

По Ж. Дюпюи в случае движения воды по трубам с гладкими внутренними стенками $\lambda \approx 0,03026$. Отсюда формула (II. 55) примет вид

$$\Delta h_{\tau} = 25 Q^2 L / D^5. \quad (II. 64)$$

Для сравнения потерь напора, определяемых по (II. 62) — (II. 64), был подсчитан уклон $(1000/i)$ для разных диаметров и расходов воды. Согласно расчетам, начиная с $D = 105$ мм формула (II. 64) дает преувеличенные (до 30 %) значения сопротивлений, а следовательно, и преувеличенные значения потерь напора по сравнению с фактическими потерями в "новых" трубах. Для старых труб расхождение между сопротивлениями возрастает, причем потери напора по формуле (II. 64) значительно меньше (до 50 %).

Зависимости (II. 62) и (II. 63), строго говоря, справедливы при коэффициенте вязкости $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, что соответствует температуре воды 10 °С. Однако ими можно пользоваться с достаточной степенью точности и при других температурах пресных подземных вод. Так, например, в пределах изменения температуры $t = 5 \div 15$ °С и $\nu = 0,2$ м/с (худший вариант) поправочный коэффициент $h = \lambda_t/\lambda_{t=10^\circ\text{C}}$ находится в интервале $0,979 \leq h \leq 1,026$.

По зависимостям (II. 62) и (II. 63) построены номограммы из выравненных точек (см. рис. 1 приложения), которые рассчитывались способом, применяемым при построении номограмм нулевого жанра с параллельными шкалами [15]. Следует подчеркнуть, что приводимые номограммы для расчета потерь напора на трение справедливы для стальных труб при практически незначительном содержании частиц песка в воде. При использовании труб из других материалов фактические потери напора будут отличаться от расчетных. В частности, по данным А.Г. Ваксмана, полимерные трубы имеют сопротивление существенно меньше, а оцинкованные — существенно больше сопротивления гладких стальных труб. Наличие же значительной примеси песка в откачиваемой воде всегда увеличивает потери на трение.

Кроме потерь напора на преодоление сопротивления в обсадной колонне при движении потока возникают потери, связанные с внезапным изменением диаметра труб при переходе от глухой части фильтра к обсадной колонне и от колонны к колонне. По теореме Борда [21] эту потерю напора можно принять равной

$$\Delta h'_\tau = \left(\frac{W_2}{W_1} - 1 \right)^2 \frac{v^2}{2g}, \quad (\text{II. 65})$$

где W_1, W_2 — площади поперечного сечения колонны, расположенной соответственно ниже и выше по течению.

Потери напора при единичном внезапном расширении потока невелики. Поэтому при двух-трех обсадных колоннах и обычном их креплении (через два диаметра) эти потери при расчетах, как правило, можно не учитывать.

Выводы

1. В интервале приемной части скважины движение жидкости происходит с переменным расходом вдоль пути. Присоединяемые к основному потоку частицы вызывают перемешивание масс жидкости и перестройку профиля скоростей. Вследствие обмена количеством движения между отдельными частицами часть их энергии теряется. Причем передача количества движения осуществляется как ударом, так и трением, а результат обмена количеством движения неизбежно проявляется в дополнительном снижении напора вдоль пути движения. Дальнейшее движение по неперфорированной части фильтра и колоннам обсадных труб также сопровождается рассеиванием энергии потока. Поэтому при отборе жидкости напор независимо от условий фильтрации уменьшается в направлении забой — устье скважины, а между уровнями внутри и у наружной стенки существует разрыв.

2. Разрыв (скачок уровня) равен потерям напора, обусловленным прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра, внутри его неперфорированной части и в колоннах обсадных труб. Эти потери напора зависят от типа приемной поверхности фильтра, эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия, длины и диаметра неперфорированной части фильтра, обсадных колонн и интенсивности отбора жидкости. Потери напора на трение внутри приемной части разности уровня не создают. Коэффициент трения в приемной части скважины в отличие от аналогичного коэффициента в неперфорированных трубах имеет другую физическую природу и пропорционален отношению скоростей присоединяемых частиц и основного потока, т.е. величина переменная.

Как показывают расчеты, потери напора в неперфорированной части фильтра и колоннах обсадных труб могут достигать значительных величин и их надо учитывать при проведении опытно-фильтрационных работ и проектировании скважин на глубокозалегающие водоносные горизонты. При определенном сочетании конструктивных элементов скважины и достаточно большом (для выбранной конструкции) дебите скачок уровня может превышать понижение уровня у наружной стенки.

3. Для приближенного решения нестационарных задач фильтрации в слоистых толщах можно использовать метод фрагментирования. Сущность метода заключается в делении области фильтрации на отдельные фрагменты-зоны, исходя из степени деформации потока и вида движения, усреднении приведенного потенциала фильтрации в зонах и нахождении общего решения как суммы частных решений уравнений.

Возможности метода фрагментирования не ограничиваются рассмотренной задачей фильтрации жидкости к скважине. Его применение целесообразно при решении широкого класса физических задач в неоднородных средах, для которых изучаемый процесс обусловлен разностью давлений, температур, электрических потенциалов на поверхностях или наличием источников (стоков) и электрических зарядов.

ОБЩЕЕ И ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПРИТОКА
ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ

§ 1. ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРИТОКА

Задача о притоке жидкости к скважине с учетом ее гидравлического сопротивления сводится к нахождению аналитических выражений для понижения уровня (напора) в эксплуатационной колонне скважины, средних скоростей и понижения уровня (пьезометрических напоров) внутри приемной части в пласте.

Вначале рассмотрим аналитическое решение уравнения (II. 54) относительно средней скорости потока, так как последующее дифференцирование полученной зависимости $\bar{v} = f(\bar{z})$ и подстановка ее в формулы (II. 43), (II. 44), (II. 10) и (II. 11) позволяют найти понижение уровня (напора) в скважине, распределение и потери напора вдоль приемной части.

Как известно, возможности аналитического решения нелинейных дифференциальных уравнений весьма ограничены и каких-либо стандартных методов не существует. Наиболее приемлемый путь решения нелинейного уравнения (II. 54) — замена переменных для последующего его приведения к виду, позволяющему провести интегрирование.

Разрешим уравнение (II. 54) относительно $(\bar{v}')^2$ и введем новые обобщенные коэффициенты. Тогда

$$\frac{dv}{-a_1 \pm d_1 \sqrt{1 + \frac{b_1^2}{d_1^2} \bar{v}^2}} = \frac{d\bar{z}}{2B}, \quad (\text{III. 1})$$

где $a_1 = A$; $d_1 = \sqrt{A^2 + 4BG}$; $b_1 = 2\sqrt{B(E + F^*)}$.

Решение уравнения (III. 1) может быть представлено различными выражениями в зависимости от вида замены произведения $(b_1^2/d_1^2) \bar{v}^2$. Возможны следующие замены:

$$\frac{b_1}{d_1} \bar{v} = \operatorname{tg} y; \quad \frac{b_1}{d_1} \bar{v} = \operatorname{ctg} y \quad \text{и} \quad \frac{b_1}{d_1} \bar{v} = \operatorname{ch} y.$$

Наиболее рациональна с точки зрения удобства дальнейших вычислений замена $(b_1/d_1) \bar{v} = \operatorname{sh} y$. При этой замене уравнение (III. 1) приводится к виду

$$\frac{\operatorname{ch} y}{a_2 + b_2 \operatorname{ch} y} dy = \frac{d\bar{z}}{2B}.$$

Отсюда в интервале однородного слоя при $b_2^2 > a_2^2 (S_L - \frac{v^2 L}{g} > 0)$ интегрированием получим

$$\frac{y}{b_2} + \frac{a_2}{b_2 \sqrt{b_2^2 - a_2^2}} \arcsin \frac{b_2^2 + a_2 \operatorname{ch} y}{a_2 + b_2 \operatorname{ch} y} + c_1 = \frac{z}{2B} \dots, \quad (\text{III. 2})$$

где $a_2 = -(a_1 b_1 / d_1)$ и $b_2 = b_1$.

Определяя C_1 из условия $\bar{v}_{z^*} = 0 = \bar{v}_0$ и подставляя его значение в (III. 2), получим

$$z = \frac{2B}{b_2} \left[(y - y_0) + \frac{a_2}{\sqrt{b_2^2 - a_2^2}} (\arcsin \frac{b_2^2 + a_2 \operatorname{ch} y}{a_2 + b_2 \operatorname{ch} y} - \arcsin \frac{b_2^2 + a_2 \operatorname{ch} y_0}{a_2 + b_2 \operatorname{ch} y_0}) \right].$$

Перейдем от переменной y и коэффициентов a_2, b_2 к средней скорости потока \bar{v} и коэффициентам A, B, E и F^* уравнения (II. 54), после элементарных преобразований и введения новых коэффициентов получим решение:

$$\bar{z}^* = \frac{D}{4\sqrt{2}\psi L^* \tau} \left[(\operatorname{Arsh} c\bar{v} - \operatorname{Arch} c\bar{v}_0) - a \left(\arcsin \frac{-b + \sqrt{1 + c^2 \bar{v}^2}}{1 - b\sqrt{1 + c^2 \bar{v}^2}} - \arcsin \frac{-b + \sqrt{1 + c^2 \bar{v}_0^2}}{1 - b\sqrt{1 + c^2 \bar{v}_0^2}} \right) \right], \quad (\text{III. 3})$$

$$\text{где } c = \frac{\delta \tau}{\sqrt{1 + \delta^2 \chi}}; \quad a = \frac{1}{\delta \sqrt{\chi}}; \quad b = \sqrt{1 + \delta^2 \chi}; \quad \tau = \sqrt{1 + F^*};$$

$$\delta = \frac{2\sqrt{2}v_L}{gD(R^* + \xi_n)} \frac{k}{\psi}; \quad \chi = \frac{gS_L}{v_L^2} - (1 + F^*) - \frac{gD^2}{8\bar{k}mv_L} R^{**};$$

L^* — длина рассматриваемого однородного интервала; z^* — расстояние от выбранного нулевого до рассматриваемого сечения; $\bar{z}^* = z^*/L^*$ — относительное расстояние от выбранного нулевого сечения.

Выражение (III. 3) является общим решением задачи притока жидкости в скважину в любом однородном интервале ее приемной части. Оно учитывает гидравлическое сопротивление скважины, фильтрационные свойства пласта и внешние граничные условия. Полученное решение позволяет определить интенсивность притока по длине приемной части

скважины, если известны коэффициент фильтрации пород в рассматриваемом интервале, обобщенный коэффициент истечения жидкости и гидравлическое сопротивление пласта от внешних границ до $r = \epsilon m$. В силу трансцендентности выражения (III. 3) решение обратной задачи, т.е. определение коэффициента фильтрации пород, исходя из значения скорости внутри приемной части скважины, выполнимо методом приближенного нахождения корней уравнения (метод итерации) или палеточным способом по зависимости $v = f(\bar{z})$. Однако при этом предварительно необходимо рассчитать величину обобщенного коэффициента истечения жидкости, поскольку иначе будет получено лишь соотношение k/ψ . Использование выражения (III. 3) для аналитического определения понижения уровня воды в скважине или ее дебита практически неосуществимо, так как решение представлено в неявном виде относительно искомых величин.

В случае однородности пород во всей приемной части скважины выражение (III. 3) можно записать в виде

$$\bar{z} = \frac{D}{4\sqrt{2}\psi L \tau} (\text{Arsh } c\bar{v} + a \arccos \frac{-b + \sqrt{1 + c^2 \bar{v}^2}}{1 - b\sqrt{1 + c^2 \bar{v}^2}}), \quad (\text{III. 4})$$

где $\bar{v}|_{\bar{z}=0} = 0$ и $\bar{v}|_{\bar{z}=L} = v_L$.

Как показывают расчеты, проведенные на ЭКВМ "Искра-125", при $k = 10 - 50$ м/сут, $\bar{v} = 0,1 - 1,0$ и $A^{**} > 5,3$ отношение первого слагаемого ко второму находится в пределах $n = 2,5 \cdot 10^{-3} \div 4,8 \cdot 10^{-2}$, и, следовательно, первым слагаемым в инженерных расчетах в ряде случаев можно пренебречь. Таким образом, в указанном диапазоне параметров пласта и скважины справедливо отношение

$$\bar{z} = \frac{D}{4\sqrt{2}\psi L \tau} a \arccos \frac{-b + \sqrt{1 + c^2 \bar{v}^2}}{1 - b\sqrt{1 + c^2 \bar{v}^2}}. \quad (\text{III. 5})$$

Расчеты по (III. 4) также показали, что при пренебрежении трением ($F^* = 0$) для существующих диаметров и дебитов эксплуатационных скважин ($L \leq 50$ м; $D \geq 0,2$ м; $Q \leq 60$ л/с) распределение притока вдоль приемной части практически всегда равномерное. Однако согласно натурным исследованиям [13, 15, 29] в ряде случаев зависимость $Q = f(z)$ нелинейная. Следовательно, в общем случае пренебрежение потерями на трение внутри ствола скважины недопустимо, а дифференциальные уравнения, составленные без учета сил трения, не отвечают реальному процессу отбора воды из скважины. Особенно большие погрешности следует ожидать в случае необсаженных скважин, для которых коэффициент трения достаточно велик.

Из (III. 4) можно получить решение для высокой проницаемости пород и незначительной их протяженности, что соответствует условиям исследования фильтров в цилиндрических лотках с песчано-гравийным заполнителем. При этом $a \rightarrow 0$ и зависимость (III. 4) примет вид

$$\bar{z} = \frac{D}{4\sqrt{2}\psi L \tau} \text{Arsh } cv,$$

откуда

$$\bar{v} = \frac{1}{c} \text{sh } \frac{4\sqrt{2}\psi L \tau}{D} \bar{z}.$$

Подставляя в это выражение значения τ и c по экспликации к (III. 3) и принимая во внимание, что $\delta^2 \chi \geq 1$ при $a \rightarrow 0$, получим

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{\frac{gS}{v} \frac{L}{L} - (1 + F^*) - \frac{gD^2}{8kmv} R^{**}}{1 + F^*}} \frac{4\sqrt{2}\psi L}{D} \sqrt{1 + F^*} \bar{z}. \quad (\text{III. 6})$$

Учитывая, что $\bar{v} = 1$ при $\bar{z} = 1$, приведем (III. 6) к виду

$$\bar{v} = \text{sh } \alpha^* \bar{z} / \text{ch } \alpha^*, \quad (\text{III. 7})$$

где

$$\alpha^* = \frac{4\sqrt{2}\psi L}{D} \sqrt{1 + F^*}.$$

§ 2. ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНУ

Если потери напора за счет прохождения воды через боковую поверхность фильтра малы, т.е. $\psi \rightarrow \infty$, то уравнение (II. 54) запишется в виде

$$A\bar{v}' - (E + F^*)\bar{v}^2 - G = 0. \quad (\text{III. 8})$$

Решением уравнения (III. 8) при $\bar{v}|_{z=0} = \bar{v}_0$ является

$$\text{arctg } \frac{a\bar{v}}{\sqrt{ac}} - \text{arctg } \frac{a\bar{v}_0}{\sqrt{ac}} = \sqrt{ac} \bar{z},$$

где $a = (E + F^*)/A$ и $c = G/A$,

откуда

$$\bar{v} = \frac{\bar{v}_0 + \beta \operatorname{tg} \gamma^* \bar{z}}{1 - \frac{\bar{v}_0}{\beta} \operatorname{tg} \gamma^* \bar{z}}, \quad (\text{III. 9})$$

где $\beta = \sqrt{c/a}$ и $\gamma^* = \sqrt{ac}$.

Согласно принятым обозначениям

$$\beta = \sqrt{\frac{\frac{g S_L}{v_L^2} - (1 + F^*) - \frac{g D^2}{8 k m v_L} R^{**}}{(1 + F^*)}}$$

и

$$\gamma = \frac{8 k_z L^* v_L}{g D^2 (R^* + \xi_n)} \sqrt{(1 + F^*) \left[\frac{g S_L}{v_L^2} - (1 + F^*) - \frac{g D^2}{8 k m v_L} R^{**} \right]}.$$

Кроме того, β можно найти по (III. 9), исходя из условия $\bar{v}|_{z=1} = 1$:

$$\beta = \frac{1 - \bar{v}_0}{2 \operatorname{tg} \gamma} + \sqrt{\frac{1 - \bar{v}_0}{4 \operatorname{tg}^2 \gamma} - \bar{v}_0}.$$

Выражение (III. 9) является решением задачи притока в скважину в любом интервале ее приемной части при пренебрежении потерями напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра.

При однородности пород во всем интервале приемной части скважины выражение (III. 9) можно записать в виде

$$\bar{v} = \operatorname{tg} \gamma^* \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma^*. \quad (\text{III. 10})$$

При контакте фильтра с водой (между фильтром и породой существует зазор — межтрубное пространство), устройстве гравийной обсыпки в породах малой проницаемости и незначительной величине эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра задачу о притоке жидкости к скважине можно свести к решению задачи фильтрации с постоянным напором на внешнем контуре фильтра и представить уравнение (II. 54) в виде

$$B (\bar{v}')^2 - (E + F^*) \bar{v}^2 - G = 0.$$

После дифференцирования уравнения получим

$$\bar{v}'' - \frac{(E + F^*)}{B} \bar{v} = 0.$$

Общее решение приведенного уравнения запишется в виде

$$\bar{v} = c_1 e^{k_1 \bar{z}} + c_2 e^{k_2 \bar{z}},$$

где $k_1 = \sqrt{E + F^*}$ и $k_2 = -\sqrt{E + F^*}$ — корни соответствующего характеристического уравнения; c_1 и c_2 — произвольные постоянные.

Частное решение, удовлетворяющее граничным условиям $\bar{v}|_{\bar{z}=0} = \bar{v}_0$ и $\bar{v}|_{\bar{z}=1} = 1$, выражается следующим образом [15]:

$$\bar{v} = \frac{\bar{v}_0 \operatorname{sh} \alpha^* (1 - \bar{z}^*) + \operatorname{sh} \alpha^* \bar{z}^*}{\operatorname{sh} \alpha^*}, \quad (\text{III. 11})$$

$$\text{где } \alpha^* = \frac{4\sqrt{2} \psi L^*}{D} (1 + F^*);$$

L^* — длина рассматриваемого интервала; \bar{z}^* — относительная ордината в этом интервале.

Выражение (III. 11) может быть представлено серией палеток, позволяющих найти распределение скоростей по заданным параметрам скважины или параметр $\psi (1 + F^*)$ в условиях однородного и неоднородного пласта (палетки не приводятся).

При $\bar{v}_0 = 0$ выражение (III. 11) принимает вид

$$\bar{v} = \operatorname{sh} \alpha^* \bar{z}^* / \operatorname{sh} \alpha^*. \quad (\text{III. 12})$$

Полученная зависимость идентична выражению (III. 7). Таким образом, распределение средних скоростей потока в приемной части реальной скважины и скважины-модели могут описываться и теми же зависимостями, если фильтрация в реальном пласте имеет плоско-радиальный характер вплоть до гравийной обсыпки, а потери напора в гравийной обсыпке скважины-модели и реальной скважине малы. Причем закон распределения скоростей по длине приемной части при контакте с высокопроницаемой обсыпкой и водой практически одинаков. Зависимости (III. 10) и (III. 12) представлены палетками на рис. 2 и 3 приложения.

Строгое с математической точки зрения общее решение уравнения притока в виде (III. 3) и частные решения (III. 5) — (III. 7), (III. 9) — (III. 12), полученные для предельных случаев, указывают на сложность создания единой математической модели истечения жидкости из пласта в скважину. Согласно формуле (III. 4) и приведенным частным решениям даже в однородной среде распределение притока вдоль приемной части различно в зависимости от характера движения воды к скважине (плоско-радиальное или пространственно-радиальное), параметров скважины, общей проводимости пласта, его протяженности и соотношения проводимостей пласта и призабойной зоны. Полученные результаты свидетельствуют о существовании по крайней мере двух возможных видов распределений средней скорости потока внутри приемной части: по закону

тангенсов или закону гиперсинусов. Уравнение (III. 5) путем замены $\arccos x$ на $\operatorname{arctg}(\sqrt{1-x^2}/x)$ может быть приведено к виду $\bar{v} = f(\operatorname{tg} \gamma \bar{z})$.

Ввиду сложности общего решения (III. 3) и некоторой неопределенности частных решений был проведен вычислительный эксперимент с целью определения закономерностей распределения средней скорости потока внутри приемной части в зависимости от вариации параметров пласта, скважины и водоотбора. Уравнение притока (II. 54) дифференцированием приводилось к виду

$$\frac{A}{2} \bar{v}'' + B \bar{v}'' \bar{v}' - (E + F^*) \bar{v} \bar{v}' = 0. \quad (\text{III. 13})$$

В уравнении (III. 13) первое слагаемое характеризует движение жидкости в пласте в зоне $r_0 \leq r \leq \epsilon m$, второе — прохождение жидкости через боковую поверхность приемной части, третье — перенос жидкости внутри приемной части. Таким образом, для выявления тенденций распределения средней относительной скорости потока в зависимости от параметров пласта, скважины и водоотбора достаточно найти кривые распределения $\bar{v} = f(\bar{z})$ при разном сочетании безразмерных коэффициентов $A, B, (E + F^*)$ и сравнить их с палеточными кривыми (рис. 2 и 3 приложения).

Результат эксперимента на ЭЦВМ УС-1040 представлен на рис. III. 1, а значения коэффициентов A, B и отношений $A/2B$ и $c = (E + F^*)/(A + 2B)$ указаны в табл. III. 1.

Анализ вычислительного эксперимента свидетельствует о независимости в общем случае степени неравномерности притока от абсолютных значений параметра сопротивления F^* . Например, в сериях опытов 21 — 30 и 31 — 40 параметры сопротивления F^* различаются в 10 раз, однако графики распределения скоростей \bar{v} с одинаковыми коэффициентами c и отношениями $A/2B$ накладываются друг на друга (см. рис. III. 1, кривые 1, 2 и 3). При снижении абсолютного значения отношения $(E + F^*)/(A + 2B)$, т.е. уменьшении коэффициента c , неравномерность притока падает (кривые 1, 4, 7 и 3, 6, 9). По мере уменьшения степени неравномерности разница между распределениями сглаживается и в пределе при малых значениях γ и α графики распределения скоростей \bar{v} практически совпадают (кривые 7 и 8).

Данные эксперимента также показывают, что вид закона распределения средних скоростей зависит от соотношения между коэффициентами A и B и не зависит от их абсолютных значений: если $A \gg B$ (кривые 1 и 4), то распределение подчиняется закону тангенсов, если $A \ll B$ (кривые 3 и 6) — закону гиперсинусов. При соизмеримости A и B распределение притока происходит по смешанному закону и графики распределения занимают промежуточное положение (кривые 2 и 5). На рис. III. 1 для каждой серии опытов нанесены лишь по одной из промежуточных кривых.

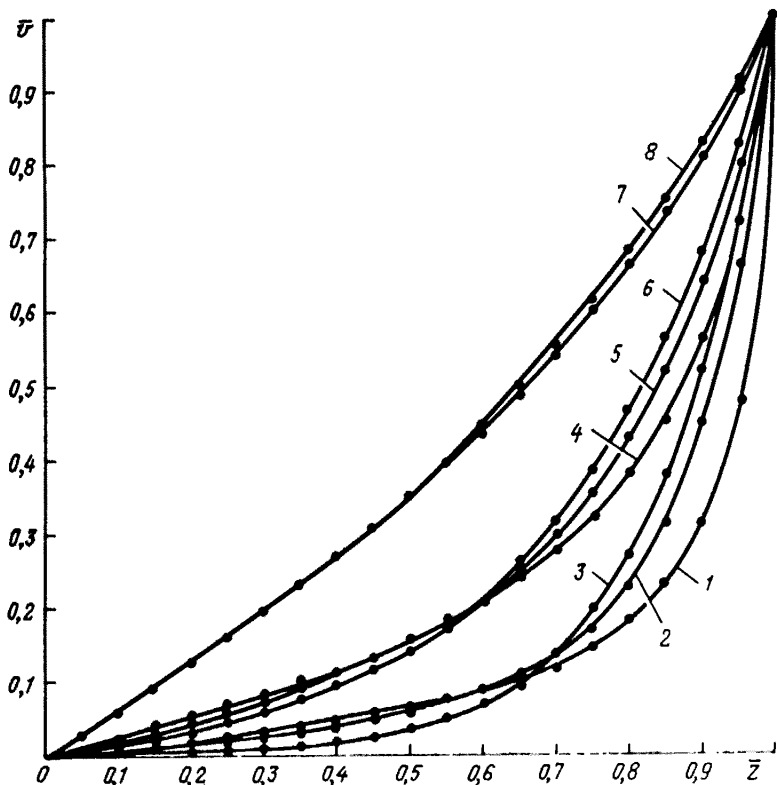


Рис. III. 1 График распределения относительных скоростей:

Номер кривой	1	2	3	4	5	6	7	8
Номер опыта	21,31	23,33	30,40	11	13	20	1	10

На основании полученных аналитических решений и вычислительного эксперимента в качестве основных функций, аппроксимирующих распределение средней скорости по длине приемной части скважины в однородном пласте, примем следующие:

в общем случае

$$\bar{v} = \operatorname{tg} \gamma \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma; \quad (\text{III. 14})$$

при контакте фильтра с водой, устройстве гравийной обсыпки в породах малой проницаемости, для фильтров-моделей в круговых фильтрационных лотках

$$\bar{v} = \operatorname{sh} \alpha \bar{z} / \operatorname{sh} \alpha, \quad (\text{III. 15})$$

Номер опыта	A	2B	A/2B	Номер опыта	A	2B	A/2B	Номер опыта	A	2B	A/2B
$E + F^* = 8,56$; $c = 1,56$ (опыты 1 – 10); $E + F^* = 40,00$; $c = 7,27$ (опыты 11 – 20)				$E + F^* = 116,00$; $c = 42,18$				$E + F^* = 11,60$; $c = 42,18$			
1,11	5,50	0,00	∞	21	2,75	0,00	∞	31	0,275	0,000	∞
2,12	5,00	0,50	10,000	22	2,50	0,25	10,000	32	0,250	0,025	10,000
3,13	3,00	2,50	1,200	23	1,50	1,25	1,200	33	0,150	0,125	1,200
4,14	2,00	3,50	0,571	24	1,00	1,75	0,571	34	0,100	0,175	0,571
5,15	1,00	4,50	0,222	25	0,50	2,25	0,222	35	0,050	0,225	0,222
6,16	0,50	5,00	0,100	26	0,25	2,50	0,100	36	0,025	0,250	0,100
7,17	0,20	5,30	0,038	27	0,10	2,65	0,037	37	0,010	0,265	0,038
8,18	0,10	5,40	0,019	28	0,05	2,70	0,019	38	0,005	0,270	0,019
9,19	0,02	5,48	0,004	29	0,01	2,74	0,004	39	0,001	0,274	0,004
10,20	0,00	5,50	0,000	30	0,00	2,75	0,000	40	0,000	0,275	0,000

причем точка $z = 0$ совпадает с забоем скважины, а точка $\bar{z} = 1$ — с выходным сечением ее приемной части при установке насоса в эксплуатационной колонне. Если насос устанавливается в отстойнике фильтра, то точка $z = 1$ совпадает с забоем скважины, а точка $\bar{z} = 0$ — с верхней кромкой приемной части.

§ 3. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРИТОКА

Анализ ранее изложенных результатов показывает, что использование приведенных зависимостей для определения понижения уровня (напора) и средней скорости потока в скважине сопряжено с определенными трудностями. Поэтому целесообразно получить менее точные, но более простые выражения, позволяющие применить несложные вычисления.

Согласно полученным аналитическим решениям и вычислительному эксперименту распределение скорости или расхода вдоль приемной части скважины определяется параметрами притока γ и α . Следовательно, задача прогнозирования распределения $\bar{v} = f(\bar{z})$ или $Q_z = f(\bar{z})$ равносильна задаче нахождения γ и α при заданных параметрах приемной части скважины, пласта и водоотбора.

Зависимость γ и α от указанных выше параметров (см. табл. III. 1) найдем путем подстановки в (III. 13) первых и вторых производных скорости \bar{v} и последующего определения γ и α как функций от коэффициентов уравнения притока A, B, E и F^* . Точность полученных зависимостей $\gamma = f(A, B, E, F^*)$ и $\alpha = f(A, B, E, F^*)$ будем считать достаточной при совпадении фактической (машинной) кривой $\bar{v} = f(\bar{z})$ и рассчитанных кривых $\bar{v} = \operatorname{tg} \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma$ и $\bar{v} = \operatorname{sh} \alpha \bar{z} / \operatorname{sh} \alpha$ в трех точ-

ках. Так как в начальной ($z = 0$) и конечной ($z = L$) точках функции распределения относительной скорости (III. 14) или (III. 15) удовлетворяются при любых значениях параметров притока γ и α , применим метод с одной узловой точкой. В качестве узловой точки выберем точку, наиболее удаленную по координате \bar{z} от прямой $\bar{v}_1 = \bar{z}$.

Разность между относительными скоростями прямой $\bar{v}_1 = \bar{z}$ и любой кривой $\bar{v} = \text{tg } \bar{z} / \text{tg } \gamma$ выразится следующим образом:

$$\Delta \bar{v} = \bar{z} - \frac{\text{tg } \gamma \bar{z}}{\text{tg } \gamma}.$$

В соответствии с принятым условием максимального удаления узловой точки от прямой $\bar{v} = \bar{z}$ первая производная разности относительных скоростей равна нулю. Отсюда для узловой точки справедливо равенство

$$\cos^2 \gamma \bar{z} = \gamma / \text{tg } \gamma, \quad (\text{III. 16})$$

а координата узловой точки

$$\bar{z} = \frac{1}{\gamma} \arccos \sqrt{\frac{\gamma}{\text{tg } \gamma}}. \quad (\text{III. 17})$$

Подставляя в (III. 13) значения первых и вторых производных функции (III. 14) и используя равенство (III. 16), получим

$$\gamma \text{tg } \gamma = \frac{E + F^*}{A + 2B}, \quad (\text{III. 18})$$

$$\text{где } A = \frac{gD^2}{8k_z L v_L} (R^* + \xi_n); \quad B = \frac{D^2}{32\psi^2 L^2}; \quad E = 1; \quad F^* = \frac{F}{16}.$$

Зависимость $\gamma = f(\gamma \text{tg } \gamma)$ представлена на рис. III. 2.

При распределении притока по зависимости (III. 15) уравнение (III. 13) принимает вид

$$\frac{A}{2} + B \frac{\alpha \text{ch } \alpha \bar{z}}{\text{sh } \alpha} - (E + F^*) \frac{\text{ch } \alpha \bar{z}}{\alpha \text{sh } \alpha} = 0,$$

а для узловой точки справедливо равенство

$$\text{ch } \alpha \bar{z} = \text{sh } \alpha / \alpha,$$

откуда

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(E + F^*)}{A + 2B}}. \quad (\text{III. 19})$$

Из выражения (III. 19) следует, что для перфорированной трубы, контактирующей с водой,

$$\alpha = \frac{4\psi L}{D} \sqrt{2(1 + F^*)}. \quad (\text{III. 20})$$

При малой скважности приемной части, т.е. при устройстве фильтра с помощью перфорации стенок фильтровой колонны, связь между параметрами притока γ , α и соответствующими параметрами пласта и скважины выразится следующим образом:

$$\gamma \operatorname{tg} \gamma = \frac{E + F^* + n_\gamma F^{**}}{A + 2B} \quad \text{и} \quad \alpha = \sqrt{\frac{2(E + F^* + n_\alpha F^{**})}{A + 2B}},$$

где

$$n_\gamma = \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \gamma - \gamma}{\gamma \operatorname{tg}^2 \gamma}}; \quad F^{**} = \frac{\lambda L}{4D}; \quad n_\alpha = \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \alpha}};$$

λ — коэффициент гидравлического трения.

Формулы (III. 18) — (III. 20) позволяют по заданным параметрам пласта и скважины (перфорированной трубы) с помощью рис. III. 2 рассчитать γ и α . По зависимостям (III. 14) и (III. 15) можно вычислить величины скоростей или расхода в любом из сечений и оценить по палеткам (рис. 2 и 3 приложения) степень неравномерности нагрузки приемной части скважины или перфорированной трубы. Например, при значениях $\gamma = 1,3$ и $0,6$ в верхнюю часть фильтра, равную $0,1L$ ($z = 0,9$), поступает соответственно 35 и 12 % всего объема воды ($\bar{v} = 0,65$ и $0,88$).

Для оценки точности приближенного решения уравнения притока жидкости в скважину было проведено сравнение относительных скоростей потока \bar{v} внутри приемной части, вычисленных по зависимостям (III. 14), (III. 15) и уравнению (III. 13). Аналитический расчет \bar{v} проводился следующим образом. Исходя из принятых параметров пласта и скважины, по формулам (III. 18) и (III. 19) находились γ и α , а затем по зависимостям (III. 14) и (III. 15) определялись значения относительных скоростей. Численное решение уравнения (III. 13) осуществлялось на ЭКВМ "Искра-125" методом Рунге — Кутты. Расчет проводился для скважины с внутренним диаметром $D = 0,2$ м и длиной $L = 20$ м. Коэффициент фильтрации принимался равным $k = 3,4722 \cdot 10^{-3}$ м/с, коэффициент истечения жидкости $\psi = 0,01 \div \infty$.

Сравнение величин относительных скоростей, рассчитанных различными способами в диапазоне $\bar{v} = 0,1 - 1$ при $\Delta \bar{v} = 0,1$, показало, что максимальное расхождение (в единичном случае) составляло 2,5 %. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что точность приближенного

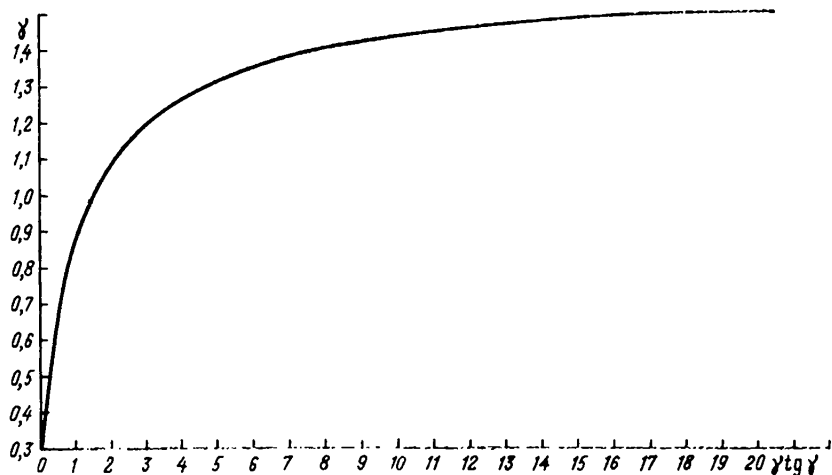


Рис. III. 2 Зависимость $\gamma = f(\gamma \operatorname{tg} \gamma)$

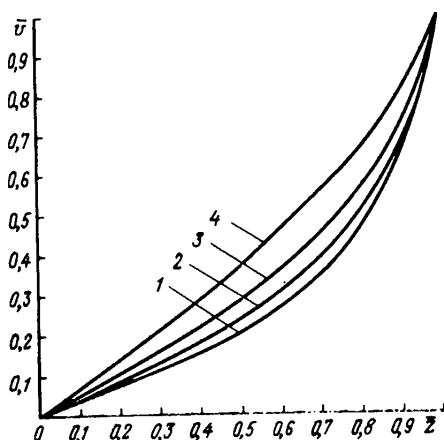


Рис. III. 3. График относительных скоростей при разных степенях вскрытия пласта:

условия эксперимента: 1 — $\bar{m} = 1,00$;
2 — $\bar{m} = 0,70$; 3 — $\bar{m} = 0,50$; 4 —
 $\bar{m} = 0,25$

расчета относительной скорости, исходя из параметров пласта и скважины, достаточно высока, и он может быть принят в практических расчетах.

Из формулы (III. 18) следует, что при одном и том же дебите в несовершенных по степени вскрытия скважинах по сравнению с совершенными распределение притока по длине приемной части более равномерное (рис. III. 3). Наличие гравийной обсыпки приводит к увеличению неравномерности распределения.

Подставляя значение относительной скорости по (III. 14) в (II. 44), получим формулу, позволяющую определить понижение уровня воды

в приемной части несовершенной скважины в однородном пласте при пренебрежении нарушением призабойной зоны и потерями напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра:

$$S(r_0, z) = \frac{Q}{2\pi kL} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma \bar{z}) \ln \frac{\epsilon m}{r_0} + \frac{Q}{2\pi km} R^{**}. \quad (\text{III. 21})$$

Как показывают расчеты, выполненные по приведенным выше зависимостям, и результаты вычислительного эксперимента, даже в идеально однородной среде распределение притока и напора вдоль приемной части совершенной скважины может быть квазиравномерным или неравномерным¹. Степень неравномерности зависит от значений параметров пласта, скважины и водоотбора.

Согласно уравнениям (II. 54) и (III. 13) влияние отдельных сопротивлений по-разному сказывается на распределении притока (разные знаки у слагаемых указанных уравнений). Если фильтрационное сопротивление пласта и гидравлическое сопротивление движению потока через боковую поверхность фильтра уменьшают неравномерность притока, то сопротивления, возникающие вследствие действия сил инерции и турбулентного трения внутри скважины, увеличивают ее. Исходя из этого и учитывая также, что влияние скважины ограничивается зоной деформации потока протяженностью $r = \epsilon m$, примем в качестве характеристики степени неравномерности притока следующее отношение потерь:

$$\eta_\gamma = \frac{\Delta h_v + \Delta h_\lambda}{\Delta h_s + 0,5 \Delta h_\psi}, \quad (\text{III. 22})$$

где $\Delta h_v + \Delta h_\lambda$ — полная потеря напора внутри приемной части скважины; Δh_s — потеря напора в пласте в зоне $r_0 \leq r \leq \epsilon m$ при нулевом гидравлическом сопротивлении совершенной скважины; Δh_ψ — потеря напора на прохождение жидкости через боковую поверхность приемной части.

Для определения физического смысла коэффициента η_γ найдем отдельные составляющие отношения (III. 22).

Согласно (II. 10) и (II. 53) полная потеря напора внутри приемной части скважины

$$\Delta h_L = \Delta h_v + \Delta h_\lambda = \frac{v^2 L}{g} (1 + F^*).$$

¹ Здесь и в дальнейшем под квазиравномерным распределением притока или напора подразумевается распределение при незначительном гидравлическом сопротивлении скважины, под неравномерным распределением — неравномерное по длине приемной части истечение жидкости из пласта в скважину вследствие действия сил инерции и турбулентного трения.

Потерю напора в пласте в зоне $r_0 \leq r \leq em$ при нулевом гидравлическом сопротивлении скважины ($dQ/dz = Q/L$) в соответствии с (II. 41) и (II. 42) можно выразить следующим образом:

$$\Delta h_s = \frac{D^2 v L}{8kL} \ln \frac{em}{r_0}.$$

Отсюда, учитывая значение $\Delta h_\psi(L)$ при равномерном притоке по (II. 14), получим

$$n_\gamma = \frac{1 + F^*}{\frac{gD^2}{8kLvL} \ln \frac{em}{r_0} + \frac{D^2}{16\psi^2 L^2}}. \quad (\text{III. 23})$$

При сравнении (III. 23) с (III. 18) видно, что $n_\gamma = \gamma \text{tg } \gamma$ и, следовательно, распределение расхода по длине приемной части скважины или распределения притока жидкости из пласта в скважину однозначно определяется отношением (III. 22), в котором учитываются процессы, происходящие лишь в зоне деформации потока — $em \leq r \leq em$. Из этого вытекает важное в практическом отношении следствие о независимости распределения притока и напоров по длине приемной части при любой величине гидравлического сопротивления скважины от расстояния до границ пласта, их формы и внешних граничных условий, если граница пласта находится не ближе расстояния $r = em$.

Согласно (III. 23) в случае незначительных потерь напора на прохождение жидкости через боковую поверхность приемной части скважины распределение притока зависит от отношения полных потерь напора внутри нее к потерям напора в пласте в зоне $r_0 \leq r \leq em$, которые отмечались бы при равномерном притоке к скважине с нулевым гидравлическим сопротивлением. Неравномерность притока начинает ощутимо проявляться с $n = 0,4$, что соответствует $\gamma = 0,6$. Чем больше n , тем неравномернее распределяется приток по длине приемной части. При прочих равных условиях наибольшую неравномерность притока следует ожидать в скважинах, расположенных вблизи водоемов и бассейнов искусственного пополнения, так как пластовые потери напора в этих случаях чрезвычайно малы.

Для перфорированных труб, контактирующих с водой, характеристикой распределения является отношение

$$n_a = \sqrt{\frac{\Delta h_v + \Delta h_\lambda}{\Delta h_\psi}}. \quad (\text{III. 24})$$

Подставляя в (III. 24) соответствующие значения потерь напора на прохождение жидкости через перфорированную стенку при равномерном

притоке, а также значения реальных потерь напора внутри трубы, получим

$$\eta_a = \frac{4\sqrt{2}\psi L}{D} \sqrt{1 + F^*}. \quad (\text{III. 25})$$

Сравнивая (III. 25) с (III. 20), будем иметь $\eta_a = \alpha$. Таким образом, параметр притока α равен корню квадратному из отношения реальных потерь напора внутри трубы к потерям напора на прохождение жидкости через перфорированную стенку при условии равномерности притока по всей длине трубы.

Равномерного распределения притока жидкости к скважине при любых значениях параметров пласта, скважины и отбора или к перфорированным трубам, контактирующим с водной средой, можно достичь с помощью неравномерной перфорации приемной части. Найдем необходимое условие создания равномерного притока, для чего продифференцируем уравнение (II. 47), считая коэффициент истечения жидкости ψ переменным по длине фильтра, а коэффициент турбулентного трения согласно (II. 53)

$$\lambda_0 \approx \lambda_m = F \frac{D}{4L} \frac{v'}{v}.$$

В результате подстановки значения λ_0 и последующего дифференцирования уравнение (II. 47) примет вид

$$A_2 \bar{v}'' + 2B_2 \frac{\bar{v}' \bar{v}''}{\bar{\psi}_z^2} - 2B_2 \frac{(\bar{v}')^2 \bar{\psi}'}{\bar{\psi}_z^3} - 2(1 + F/16) \bar{v} \bar{v}' = 0, \quad (\text{III. 26})$$

$$\text{где } A_2 = \frac{gD^2}{8kLv_L} (R^* + \xi_n); \quad B_2 = \frac{D^2}{32\psi_L^2 L^2}.$$

При равномерном притоке $\bar{v} = \bar{z}$, $\bar{v} = 1$, $\bar{v}'' = 0$ и уравнение (III. 26) можно переписать следующим образом:

$$\frac{d\bar{\psi}}{\bar{\psi}^3} = \frac{\psi_L^2 L (16 + F)}{D^2} d\bar{z}^2. \quad (\text{III. 27})$$

Интегрируя (III. 27), получим

$$\frac{1}{\bar{\psi}_z^2} = \frac{2\psi_L^2}{D^2} (16 + F) \bar{z}^2 + C_1. \quad (\text{III. 28})$$

Определив постоянную C_1 из условия $\psi_z|_{z=0} = \psi_0$ и подставив полученное выражение в (III. 28), будем иметь

$$\bar{\psi}_0^2 - \bar{\psi}_z^2 = \frac{2\psi_L^2 L^2}{D^2} \bar{\psi}_z^2 \bar{\psi}_0^2 (16 + F) \bar{z}^2. \quad (\text{III. 29})$$

Так как в приведенном выражении правая часть всегда положительна, $\bar{\psi}_0 > \bar{\psi}_z$, т.е. для создания равномерного притока забойная часть фильтра¹ должна иметь большую скважность.

Преобразуя (III. 29) и переходя от относительных величин к абсолютным, окончательно получим, считая $\psi = \mu\eta$:

$$\eta_z = \frac{\eta_0}{\sqrt{1 + \frac{2(\mu\eta)_0^2}{D^2(16+F)z^2}}}, \quad (\text{III. 30})$$

где η_z — необходимая скважность в сечении z ; η_0 и $(\mu\eta)_0$ — соответственно скважность и коэффициент истечения жидкости в начальном сечении фильтра ($z \rightarrow 0$).

Если распределение скважности по длине фильтра соответствует условию (III. 30), то поступление жидкости в скважину (перфорированную трубу) всегда будет равномерным в пределах вскрытой мощности пласта.

Приведенный выше прием определения закона перфорации позволяет найти необходимую по длине фильтра скважность для любого желаемого распределения скоростей, что может представлять интерес в ряде технических приложений. При этом достаточно задаться распределением средней скорости в виде $\bar{v} = f(\bar{z})$, затем подставить значения первых и вторых производных в уравнение (III. 26) и определить соответствующее значение $\psi_z = f(A, B, F, \psi_0, z)$.

§ 4. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПРИТОКА МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

По И.А. Чарному [40], в случае установившегося движения при любом распределении притока и пренебрежении потерями напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра понижение уровня воды в произвольной точке однородного пласта описывается выражением

$$S(r, z) = \frac{q_0}{2\pi k} \ln \frac{R}{r} + \frac{m}{2\pi^2 k r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_0 \left(\frac{\pi n r}{m} \right)}{k_1 \left(\frac{\pi n r_0}{m} \right)} q_n \frac{\cos \frac{\pi n z}{m}}{n}, \quad (\text{III. 31})$$

¹Здесь и далее рассматривается схема отбора при установке насоса выше приемной части (отбор "сверху").

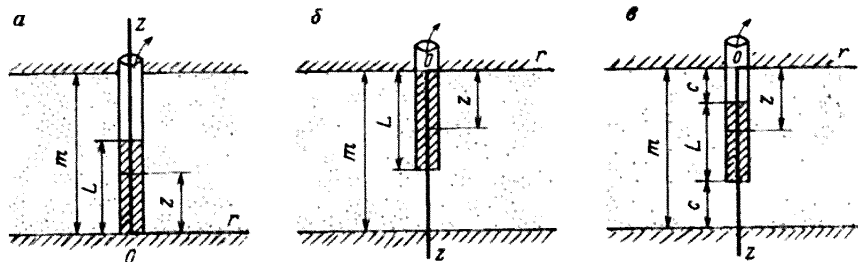


Рис. III. 4 Схема расположения скважин в пласте:

а, б, в — фильтр соответственно у подошвы, кровли и в середине

где $q_0 = \frac{1}{m} \int_0^m q(z) dz$; $q_n = \frac{2}{m} \int_0^m q(z) \cos \frac{\pi n z}{m} dz$; $q(z) = dQ/dz$ — интенсивность притока.

Задаваясь интенсивностью притока по (III. 14), представим решение уравнения в виде

$$S(r, z) = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{R}{r} + \xi_1 \right), \quad (\text{III. 32})$$

где ξ_1 — безразмерное сопротивление, обусловленное несовершенством скважины по степени вскрытия.

В случае расположения фильтра у подошвы пласта примем (рис. III. 4, а)

$$q(z) = \begin{cases} \frac{Q}{L} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma}{L} z} & \text{при } 0 \leq z \leq L \\ 0 & \text{при } L < z \leq m \end{cases},$$

откуда

$$q_0 = \frac{Q}{m} \text{ и } q_n = \frac{2Q}{m} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \int_0^L \frac{\cos \pi n \bar{m} \bar{z}}{\cos^2 \gamma \bar{z}} dz, \quad (\text{III. 33})$$

где $\bar{z} = z/L$; $\bar{m} = L/m$.

Приведенный интеграл не представляется в элементарных функциях, поэтому заменим $1/\cos^2 \gamma \bar{z}$ его приближенным значением в виде степенного многочлена:

$$\frac{1}{\cos^2 \gamma \bar{z}} = 1 + a_1 (\gamma \bar{z})^2 + a_2 (\gamma \bar{z})^4 \quad \text{при } \gamma \bar{z} \leq 1, 0, \quad (\text{III. 34})$$

где $a_1 = 0,748265$ и $a_2 = 1,532568$.

Интегрируя (III. 33) и подставляя значения q_0 и q_n в (III. 31), окончательно получим

$$\begin{aligned} \xi_{1n} = & \frac{2\bar{r}_m}{\pi^2 m} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} [(1 + a_1 \gamma^2 + a_2 \gamma^4) G_2 - \\ & - \frac{(2a_1 \gamma^2 + 12a_2 \gamma^4)}{(\pi m)^2} G_4 + \frac{24a_2 \gamma^4}{(\pi m)^4} G_6 + \\ & + \frac{(2a_1 \gamma^2 + 4a_2 \gamma^4)}{\pi m} H_3 - \frac{24a_2 \gamma^4}{(\pi m)^3} H_5], \end{aligned} \quad (\text{III. 35})$$

$$\text{где } G_j = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\pi n / \bar{R}_m)}{K_1(\pi n / \bar{r}_m)} \frac{\sin \pi n \bar{m} \cos \pi n \bar{z}^*}{n^j};$$

$$H_j = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\pi n / \bar{R}_m)}{K_1(\pi n / \bar{r}_m)} \frac{\cos \pi n \bar{m} \cos \pi n \bar{z}^*}{n^j};$$

$$R_m = m/r; \quad \bar{r}_m = m/r_0; \quad \bar{z}^* = z/m.$$

Для фильтра, примыкающего к кровле пласта (рис. III. 4, б),

$$q(z) = \begin{cases} \frac{a}{L} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma}{L} (L-z)} & \text{при } 0 \leq z \leq L; \\ 0 & \text{при } L < z \leq m \end{cases}$$

$$q_0 = \frac{Q}{m} \text{ и } q_n = \frac{2Q}{m} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \int_0^1 \frac{\cos \pi n \bar{m} \bar{z}}{\cos^2 \gamma (1 - \bar{z})} d\bar{z}.$$

Отсюда аналогичным образом получим формулу для безразмерного сопротивления

$$\zeta_{1\kappa} = \frac{2\bar{r}m}{\pi^2 \bar{m}} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \left[G_2 - \frac{2a_1 \gamma^2}{(\pi \bar{m})^2} G_4 + \frac{24a_2 \gamma^4}{(\pi \bar{m})^4} G_6 + \right. \\ \left. + \frac{2a_1 \gamma^2 + 4a_2 \gamma^4}{(\pi \bar{m})} T_3 - \frac{24a_2 \gamma^4}{(\pi \bar{m})^3} T_5 \right], \quad (\text{III. 36})$$

$$\text{где } T_l = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\pi n / \bar{R}_m)}{K_1(\pi n / \bar{r}_m)} \frac{\cos \pi n \bar{z}^*}{n^l}; \quad \bar{z}^* = \frac{z}{m}.$$

Для фильтра, расположенного в середине пласта (рис. III.4, в),

$$q(z) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq z < c \\ \frac{Q}{L} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \frac{1}{\cos^2 \frac{\gamma}{L} (c + L - z)} & \text{при } c \leq z \leq c + L; \\ 0 & \text{при } c + L < z \leq m \end{cases}$$

$$q_0 = \frac{Q}{m} \text{ и } q_n = \frac{2Q}{m} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \int_c^{1+c} \frac{\cos \pi n \bar{m} \bar{z}}{\cos^2 \gamma [(1 + \bar{c}) - \bar{z}]} d\bar{z},$$

где $\bar{c} = c/L$; c — расстояние выходного сечения приемной части скважины от кровли пласта.

После интегрирования, подстановки полученного значения q_n в (III. 31) и последующей замены выражений $\pi n \bar{m} (1 + c)$ и $\pi n \bar{m} \bar{c}$ на тождественные им $\pi n \left(\frac{1 + \bar{m}}{2} \right)$ и $\frac{\pi n (1 - \bar{m})}{2}$ получим

$$\zeta_{1c} = \frac{2\bar{r}m}{\pi^2 \bar{m}} \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \left[G_2^{(1+m)} (1 + a_1 \gamma^2 + a_2 \gamma^4) G_2^{1-m} - \right. \\ \left. - \frac{2a_1 \gamma^2}{(\pi \bar{m})^2} G_4^{(1+m)} + \frac{2a_1 \gamma^2 + 12a_2 \gamma^4}{(\pi \bar{m})^2} G_4^{(1-m)} + \right.$$

$$+ \frac{24a_2\gamma^4}{(\pi\bar{m})^4} (G_6^{(1+\bar{m})} - G_6^{(1-\bar{m})}) + \frac{2a_1\gamma^2 + 4a_2\gamma^4}{(\pi\bar{m})} H_3^{(1-m)} -$$

$$- \frac{24a_2\gamma^4}{(\pi\bar{m})^3} H_5^{(1-\bar{m})} \}, \quad (\text{III. 37})$$

где

$$G_i^{(1+\bar{m})} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\pi n/\bar{R}_m)}{K_1(\pi n/\bar{r}_m)} \frac{\sin \pi n \frac{(1+\bar{m})}{2} \cos \pi n \bar{z}^*}{n^i};$$

$$G_i^{(1-\bar{m})} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\pi n/\bar{R}_m)}{K_1(\pi n/\bar{r}_m)} \frac{\sin \pi n \frac{(1-m)}{2} \cos \pi n \bar{z}^*}{n^i};$$

$$H_i^{(1-\bar{m})} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\pi n/\bar{R}_m)}{K_1(\pi n/\bar{r}_m)} \frac{\cos \pi n \frac{(1-\bar{m})}{2} \cos \pi n \bar{z}^*}{n^i};$$

$$\bar{z}^* = \frac{z}{m}.$$

Расчеты, выполненные по приведенным формулам, показывают, что в отличие от решений, не учитывающих гидравлическое сопротивление самой скважины, дополнительные потери напора вследствие несовершенства по степени вскрытия различны для фильтров, расположенных у подошвы и в кровле пласта. При малой величине γ , т.е. при незначительном сопротивлении приемной части скважины, $\gamma/\text{tg } \gamma \rightarrow 1$ и слагаемыми, содержащими γ , можно пренебречь. При этом из формул (III. 35) и (III. 36) вытекает решение И.А. Чарного [40], а из формулы (III. 37) — решение, расчеты по которому при $(m/r) > 100$ дают результаты, практически идентичные формуле Н.Н. Веригина [14].

Учитывая, что величина безразмерного сопротивления, обусловленного несовершенством скважины по степени вскрытия, не зависит от внешних граничных условий пласта и через некоторый небольшой промежуток времени принимает значение, равное ξ_1 [14], выражение для понижения уровня воды в любой точке пласта при заданном дебите в условиях неустановившегося движения с учетом гидравлического сопротивления скважины можно записать в общем виде:

$$S(r, z) = \frac{Q}{4\pi km} (R + 2\xi_1) + \Delta h_r, \quad (\text{III. 38})$$

где R определяется по графикам и формулам, приведенным в работах [7, 14, 43]; ξ_1 находится по (III. 35) — (III. 37).

Период откачки, когда временной составляющей ξ_1 можно пренебречь, должен определяться в соответствии с рекомендациями Н.Н. Веригина [14].

Сравнение результатов вычислений по точным (при заданной интенсивности притока) формулам (III. 32), (III. 35) — (III. 37) и приближенной формуле (III. 21) показало их приемлемую сходимость, что свидетельствует о возможности применения простой приближенной формулы для расчета понижения уровня в скважинах. Результаты сравнения приведены в табл. III. 2. При расчетах по формуле (III. 21) принималось следующее: для фильтров, расположенных у кровли и подошвы пласта, $\epsilon = m(1 - \bar{m})$; для фильтров, установленных в его середине, $\epsilon = 0,5m(1 - \bar{m})$; при полном вскрытии пласта $\epsilon = 0,25$. Значения γ находились по (III. 18), исходя из параметров пласта, скважины и водоотбора, которые назначались при проведении экспериментальных исследований на модели системы пласт — скважина. В целях более полной оценки достоверности полученных результатов в табл. III. 2 помимо расчетных понижений получены также данные модели.

Таблица III. 2

\bar{m}	γ_p	\bar{z}	S, м		
			по формуле (III. 21)	по формуле (III. 32)	по модели
1,0	1,300	0,150	1,00	1,10	0,93
		0,800	2,01	2,16	2,04
0,7*	1,208	0,142	1,30	1,27	1,25
		0,839	2,87	3,00	2,95
0,5*	1,103	0,200	1,78	1,78	1,79
		0,900	4,29	4,17	4,14
0,25*	0,848	0,200	3,50	3,65	3,58
		0,960	6,48	6,28	6,45
0,7**	1,207	0,214	1,33	1,42	1,28
		0,803	2,60	2,61	2,52
0,5**	1,104	0,200	1,78	1,91	1,78
		0,800	3,35	3,12	3,16
0,25**	0,848	0,200	3,51	3,83	3,66
		0,880	5,76	4,96	5,53
0,25***	0,848	0,100	3,09	2,90	3,08
		0,900	5,10	4,55	5,30
0,5***	1,104	0,100	1,72	1,67	1,61
		0,900	3,84	3,71	3,38
0,7***	1,208	0,214	1,38	1,35	1,25
		0,786	2,32	2,58	2,40

Примечание. Фильтр расположен: *у кровли, **у подошвы, ***в середине пласта.

§ 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ДЛИНЕ ПРИЕМНОЙ ЧАСТИ

С целью выявления закономерностей движения потока внутри приемной части скважины рассмотрим распределение потерь напора, входных скоростей и интенсивности массопритока, а также представим ряд основных зависимостей, которые позволят более эффективно обрабатывать данные экспериментальных исследований скважины и перфорированных труб — сборников и распределителей воды. Следует отметить, что основные просчеты при интерпретации натурных исследований объясняются не столько погрешностью приборов и устройств, сколько ошибочностью принятого алгоритма обработки результатов измерений из-за незнания особенностей рассматриваемого процесса и его основных характеристик.

В связи с тем, что распределение притока может происходить по разным законам, все основные зависимости приведем для трех случаев: любого закона распределения гидравлических характеристик потока и распределения по законам тангенсов или гиперсинусов. Кроме того, учитывая, что в экспериментах закономерности движения потока могут выявляться замером давления и скорости по длине приемной части скважины (перфорированной трубы), соответствующие зависимости приведем для случаев замеров скорости, давления и совместного применения обоих методов измерений.

В соответствии с выражениями (II. 10) и (II. 14) независимо от закона распределения притока по длине приемной части потери напора в любом сечении можно выразить следующим образом:

$$\Delta h_v = \frac{16Q_L^2}{\pi^2 g D^4} A_v; \quad \Delta h_\lambda = \frac{Q_L^2}{g \pi^2 D^4} A_\lambda; \quad (\text{III. 39})$$

$$\Delta h_\psi = \frac{Q_L^2}{2g (\pi D \psi L)^2} A(\psi),$$

$$\text{где } A_v = \bar{Q}_x^2; \quad A_\lambda = \frac{8L}{D} \int_0^1 \lambda \bar{Q}_x^2 d\bar{x} \quad \text{и} \quad A_\psi = \left(\frac{d\bar{Q}}{d\bar{x}} \right)^2.$$

Величина входной (радиальной) скорости $u_{r_0}(z)$ и интенсивность массопритока ω_z согласно выражениям (II. 13)⁰ и (II. 51) определяются зависимостями

$$u_{r_0}(z) = \frac{Q}{\pi DL} A_u \quad \text{и} \quad \omega_z = \frac{4L}{D} A_\omega, \quad (\text{III. 40})$$

где $A_u = \bar{Q}'_z$; $A_\omega = \bar{Q}_z / \bar{Q}'_z$; $\bar{Q}_z = Q_z / Q_L$; \bar{Q}'_z — первая производная относительного расхода Q_z по относительной ординате z .

Согласно зависимости (II. 53) коэффициент турбулентного трения в любом сечении приемной части

$$\lambda_m = F \frac{D}{4L A_\omega}. \quad (\text{III. 41})$$

Из приведенного выше следует, что характер изменения любой из рассматриваемых величин по длине приемной части адекватен распределению соответствующего коэффициента A_j . Поэтому в каждом случае достаточно найти значение этого коэффициента и рассмотреть особенности его распределения.

В формулах (III. 39) — (III. 41) коэффициенты A_j могут быть представлены различными выражениями в зависимости от вида распределения притока вдоль приемной части скважины (перфорированной трубы). При любом распределении притока и распределениях по законам тангенсов и гиперсинусов эти коэффициенты соответственно

$$A_{1v} = \bar{Q}'_z{}^2; A_{2v} = \frac{\text{tg}^2 \gamma \bar{z}}{\text{tg}^2 \gamma}; A_{3v} = \frac{\text{sh}^2 \alpha \bar{z}}{\text{sh}^2 \alpha}; \quad (\text{III. 42})$$

$$A_{1\lambda} = F \bar{Q}'_z{}^2; A_{2\lambda} = F \frac{\text{tg}^2 \gamma \bar{z}}{\text{tg}^2 \gamma}; A_{3\lambda} = F \frac{\text{sh}^2 \alpha \bar{z}}{\text{sh}^2 \alpha}; \quad (\text{III. 43})$$

$$A_{1\psi} = (\bar{Q}'_z)^2; A_{2\psi} = \left[\frac{\gamma}{\text{tg} \gamma} (1 + \text{tg}^2 \gamma \bar{z}) \right]^2; A_{3\psi} = \frac{\alpha^2 \text{ch}^2 \alpha \bar{z}}{\text{sh}^2 \alpha}; \quad (\text{III. 44})$$

$$A_{1u} = \bar{Q}'_z; A_{2u} = \frac{\gamma}{\text{tg} \gamma} (1 + \text{tg}^2 \gamma \bar{z}); A_{3u} = \frac{\alpha \text{ch} \alpha \bar{z}}{\text{sh} \alpha}; \quad (\text{III. 45})$$

$$A_{1\omega} = \frac{\bar{Q}_z}{\bar{Q}''_z}, A_{2\omega} = \frac{\sin 2\gamma \bar{z}}{2\gamma}, A_{3\omega} = \frac{1}{\alpha} \text{th} \alpha \bar{z}. \quad (\text{III. 46})$$

Как следует из (III. 39), (III. 42) и (III. 43), независимо от закона распределения притока соотношение между потерями напора на турбулентное трение и перенос жидкости постоянно в любом сечении и определяется выражением

$$\Delta h_\lambda = \frac{F}{16} \Delta h_v. \quad (\text{III. 47})$$

Из выражения (III. 47) видно, что потери напора на турбулентное трение для перфорированной гладкостенной трубы, помещенной в воду, всегда меньше (согласно экспериментальным данным для перфорированных труб, контактирующих с водой, $F = 4 \div 12$), а для скважины они могут быть больше или меньше соответствующих потерь на перенос жидкости.

Общая потеря напора внутри приемной части скважины (перфорированной трубы) при любом законе распределения притока и распределении по законам тангенсов и гиперсинусов соответственно равна

$$\Delta h_z = \frac{\alpha_z^2}{g\pi^2 D^4} (F + 16); \quad \Delta h_z = \frac{\alpha_L^2}{g\pi^2 D^4} (F + 16) \frac{\operatorname{tg}^2 \gamma \bar{z}}{\operatorname{tg}^2 \gamma}; \quad (\text{III. 48})$$

$$\Delta h_z = \frac{\alpha_L}{g\pi^2 D^4} (F + 16) \frac{\operatorname{sh}^2 a \bar{z}}{\operatorname{sh}^2 a}.$$

Анализ изменения величин A_i показал, что потери напора и входная скорость являются монотонно возрастающими функциями в строгом смысле слова. Интенсивность массопритока в случае распределения притока по закону тангенсов имеет максимум в точке

$$\bar{z} = 0,785/\gamma, \quad (\text{III. 49})$$

если $\gamma > 0,785$. В противном случае интенсивность массопритока также является монотонно возрастающей функцией. При распределении притока по закону гиперсинусов интенсивность массопритока — монотонно возрастающая функция в широком смысле слова, т.е. значения возрастают до некоторого сечения \bar{z}_ω , если $a > 2,6$, после чего массоприток практически постоянен. При $a \leq 2,6$ интенсивность массопритока возрастает монотонно. Величину \bar{z}_ω с точностью соответственно 1 и 5 % можно рассчитать по зависимостям

$$\bar{z}_\omega = 2,647/a \quad \text{и} \quad \bar{z}_\omega = 1,832/a. \quad (\text{III. 50})$$

Графики распределения гидравлических характеристик потока по длине фильтра приведены на рис. III. 5. Для большей наглядности на рис. III. 5 приводится отношение соответствующих гидравлических характеристик в различных сечениях приемной части к их максимальной величине в выходном сечении ($\bar{z} = 1$). Исключение составляет коэффициент турбулентного трения, который для удобства относится к минимальному значению.

Потери напора и входные скорости в приведенном частном случае возрастают по закону, близкому к экспоненциальному, достигая максимума у выходного сечения фильтра (см. рис. III. 5). Таким образом, разность между уровнями внутри фильтра и у его наружной стенки будет различна вдоль приемной части. Существенное отличие приведенных кривых распределения заключается в том, что при законе гиперсинусов

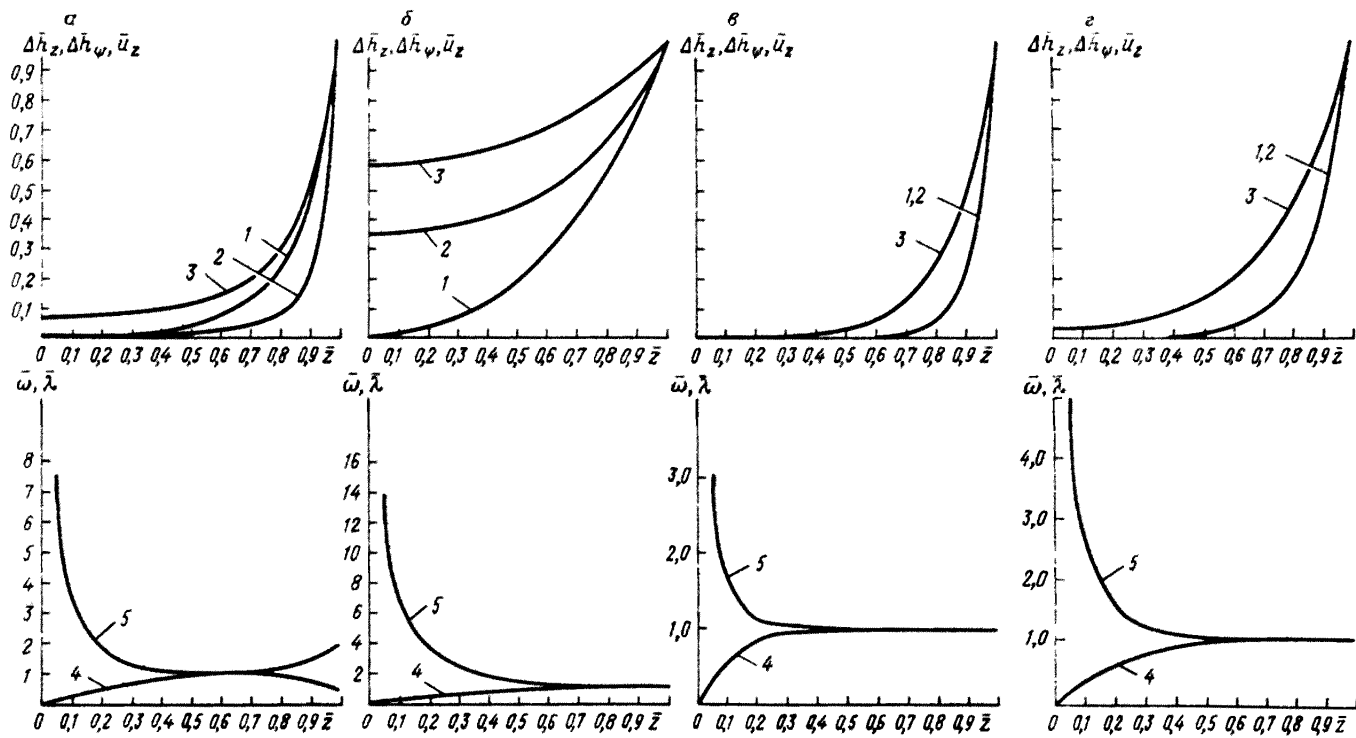


Рис. III. 5. Графики распределения гидравлических характеристик потока по длине фильтра:

а — $\bar{v} = \operatorname{tg} \gamma \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma$; $\gamma = 1,3$; **б** — $\bar{v} = \operatorname{tg} \gamma \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma$; $\gamma = 0,7$; **в** — $\bar{v} = \operatorname{sh} \alpha \bar{z} / \operatorname{sh} \alpha$; $\alpha = 70$; **г** — $\bar{v} = \operatorname{sh} \alpha \bar{z} / \operatorname{sh} \alpha$; $\alpha = 4,0$; **1** — $\Delta \bar{h}_z = f(\bar{z})$; **2** — $\Delta \bar{h}_\psi = f(\bar{z})$; **3** — $\bar{u}_z = f(\bar{z})$; **4** — $\bar{\omega} = f(\bar{z})$; **5** — $\bar{\lambda} = f(\bar{z})$

(влияние пласта на распределение притока практически незначительно) относительные потери напора внутри фильтра и относительные потери напора, обусловленные прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра, равны.

Иной характер распределения отмечается для коэффициента турбулентного трения λ_m . В случае распределения притока по закону тангенсов λ_m убывает от нулевого сечения до точки минимума, определяемого по соотношению (III. 49), а затем вновь возрастает, если $\gamma > 0,785$. При $\gamma < 0,785$ коэффициент λ_m — монотонно убывающая функция. В случае распределения притока по закону гиперсинусов значения λ_m убывают от нулевого сечения до точки \bar{z}_ω , определяемой по выражениям (III. 50), после чего λ_m можно принять в практических расчетах в качестве постоянной. Именно этой особенностью, т.е. наличием гораздо больших сопротивлений в нижней части фильтра, объясняется неоднократно наблюдавшийся на практике приток воды преимущественно в его верхнюю часть.

Диапазон λ_m весьма широк — от десятков единиц в сечении $z \approx 0$ до величин, в 3 — 4 раза и более превышающих значение коэффициента гидравлического трения λ (в гладких неперфорированных трубах $\lambda = 0,035 \div 0,040$) в точке минимума или в конечном сечении. Подобное соотношение между коэффициентами λ и λ_m объясняется тем, что в условиях массопотока через стенки скважины (трубы) происходит разрушение пограничного слоя с превращением его в дискретные вихри, отрыв струй и, как следствие, существенно больший, чем в неперфорированных трубах, обмен количеством движения между отдельными макрообъемами жидкости. Очевидно, что иррегулярность потока максимальна на забое приемной части, где практически вся кинетическая энергия входящих струй превращается в тепло и механическую энергию выработки профиля осевых скоростей. Причем в сечении $z \approx 0$ средняя осевая скорость потока близка к нулю, а следовательно, коэффициент турбулентного трения $\lambda_m = -8\tau/(\rho v^2)$ достигает максимума. По мере движения потока вверх иррегулярность течения снижается, затем в некоторой степени стабилизируется. Соответственно вначале резко уменьшается, а затем стабилизируется и значение коэффициента турбулентного трения.

Рассмотрим также особенности распределения напоров и сравним их с распределением относительных скоростей.

Как показано в § 2 гл. II, напор в любом сечении приемной части скважины (перфорированной трубы) определяется выражением (II. 11). Отсюда с учетом зависимостей (II. 53), (III. 14) и (III. 15) можно записать

$$H_z = H_L + \frac{Q_L^2}{8\pi^2 D^4} (F + 16) A_H \quad \text{или} \quad S_z = S_L - \frac{Q_L^2}{8\pi^2 D^4} (F + 16) A_H. \quad (\text{III. 51})$$

При любом законе притока, распределении по закону тангенсов или гиперсинусов коэффициенты A_H соответственно равны

$$A_{1H} = (1 - \bar{Q}_z^2); A_{2H} = (1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \gamma \bar{z}}{\operatorname{tg}^2 \gamma}); A_{3H} = (1 - \frac{\operatorname{sh}^2 \alpha \bar{z}}{\operatorname{sh}^2 \alpha}). \quad (\text{III. 52})$$

Введем безразмерное разностное понижение уровня и безразмерный разностный напор:

$$\bar{S}_z = \frac{S_z - S_0}{S_L - S_0} \quad \text{и} \quad \bar{H}_z = \frac{H_0 - H_z}{H_0 - H_L}, \quad (\text{III. 53})$$

где S_z (H_z), S_0 (H_0) и S_L (H_L) — соответственно понижение уровня (напор) в сечениях z , 0 и L .

Из выражений (III. 53) с учетом (III. 51) и (III. 52) простой подстановкой получим

$$\bar{S}_z = \bar{H}_z = \bar{Q}_z^2; \quad \bar{S}_z = \bar{H}_z = \frac{\operatorname{tg}^2 \gamma \bar{z}}{\operatorname{tg}^2 \gamma} \quad \text{и} \quad \bar{S}_z = \bar{H}_z = \frac{\operatorname{sh}^2 \alpha \bar{z}}{\operatorname{sh}^2 \alpha}. \quad (\text{III. 54})$$

Первое из соотношений (III. 54) свидетельствует о равенстве безразмерного разностного понижения уровня (напора) квадрату относительного расхода (относительной средней скорости потока) в любом из сечений приемной части скважины. По последним двум соотношениям (III. 54) построены палетки (рис. 4 и 5 приложения). Сравнение этих палеток с палетками, приведенными на рис. 2 и 3 приложения, показывает, что разностное понижение уровня (напора) является более чувствительным индикатором наличия и величины гидравлического сопротивления приемной части, чем средняя относительная скорость. Это необходимо учитывать при проведении экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях. По данным измерения давления в различных сечениях цилиндрической трубы с проницаемыми стенками [27], давления у внутренней стенки и на оси трубы одинаковы, т.е. $\partial p / \partial r = 0$, в то время как скорость в поперечном сечении потока различна по радиусу.

Помимо зависимости (III. 54) для перфорированной трубы, контактирующей с водой, согласно (II. 14) справедливы также выражения

$$\Delta \bar{h}_\psi = \frac{h_\kappa - h_z}{h_\kappa - h_L} = \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha \bar{z}}{\operatorname{ch}^2 \alpha} \quad \text{или} \quad 1 - \frac{\Delta p_z}{\Delta p_L} = \frac{\operatorname{ch}^2 \alpha \bar{z}}{\operatorname{ch}^2 \alpha}, \quad (\text{III. 55})$$

где $\Delta \bar{h}_\psi = \Delta h_\psi(z) / \Delta h_\psi(L)$ — относительная разность уровней (давле-

ний) снаружи и внутри трубы в произвольном и выходном сечениях; h_k , h_z и h_L — соответственно высота уровня воды над трубой и напоры внутри нее в сечениях z и L ; Δp_z и Δp_L — разности давлений снаружи и внутри трубы в сечениях z и L .

По выражению (III. 55) построена палетка (рис. 6 приложения). Совокупность палеток (рис. 2 — 6 приложения) позволяет по данным экспериментальных исследований определить параметры распределения притока γ , α и параметр внутреннего сопротивления приемной части F исходя из соотношений (III. 18) и (III. 19), а затем по соответствующим формулам найти коэффициент турбулентного трения, потери напора, входную скорость и интенсивность массопритока. Величину F можно определить также по данным эксперимента на скважине (перфорированной трубе), используя следующие зависимости.

При измерении скорости и напора (давления) внутри приемной части скважины (трубы) согласно (III. 48)

$$F = 16 \left(\frac{g \Delta h_z}{\bar{v}^2 \bar{v}_z^2} - 1 \right). \quad (\text{III. 56})$$

При измерении только напора (давления) на основании (III. 54) будем иметь

$$F = 16 \left(\frac{g \Delta h_z}{v_L^2 S_z} - 1 \right) \text{ или } F = 16 \left(\frac{g \Delta h_z}{v_L^2 H_z} - 1 \right). \quad (\text{III. 57})$$

Подставляя в (III. 57) вместо Δh_z и S_z величины напоров в соответствующих сечениях, получим

$$F = 8(\xi - 2), \quad (\text{III. 58})$$

где $\xi = 2g\Delta h_L / V_L^2$; Δh_L — полная потеря напора внутри приемной части скважины.

Из приведенного видно, что параметр внутреннего сопротивления F является величиной, пропорциональной отношению полной потери напора к скоростному напору в выходном сечении. В гидравлике подобное отношение носит название коэффициента местного гидравлического сопротивления. Поэтому по аналогии назовем отношение ξ коэффициентом гидравлического сопротивления приемной части скважины (перфорированной трубы). Этот коэффициент целесообразно использовать в качестве одного из основных критериев при гидравлической оценке применяемых фильтров и создаваемых опытных образцов. Так как $F \geq 0$, то согласно (III. 58) $\xi \geq 2$.

Из выражения (III. 58) также следует, что турбулентным трением внутри приемной части скважины или перфорированной трубы можно пренебречь, если $\xi \rightarrow 2$ или $g\Delta h_L \rightarrow v_L^2$. В противном случае учет гидравлических сопротивлений в инженерных расчетах необходим.

Зависимость для определения коэффициента трения в приемной части водозаборных скважин можно найти непосредственно из дифференциального уравнения (II. 9) путем замены квадрата средней скорости потока на эквивалентное ему значение разностного напора по (III. 53) :

$$\lambda_z = - \frac{D}{\Delta h_z} \left(\frac{2g \Delta h_L}{v_L^2} - 2 \right) \frac{dh_z}{dz} \text{ или } \lambda_z = - \\ = - \frac{D}{\Delta h_z} \left(\frac{2g \Delta h_z}{v_z^2} - 2 \right) \frac{dh_z}{dz} . \quad (\text{III. 59})$$

Производную напора по координате z рекомендуется находить по сглаженной кривой $h_z = f(z)$ численным дифференцированием для равноотстоящих точек при $n = 2$ (три точки) :

$$\frac{dh_1}{dz} = \frac{1}{2l} (h_2 - h_0) , \quad (\text{III. 60})$$

где l — величина интервала разбиения.

Выражение (III. 59) позволяет определить λ_z как в скважинах, так и в перфорированных трубах, контактирующих с водой, при любом законе распределения средней скорости потока v_z и коэффициента истечения жидкости ψ . В частных случаях из (II. 53) следует

$$\lambda_z = F \frac{D}{2L} \frac{\gamma}{\sin 2\gamma z} \text{ или } \lambda_z = F \frac{D}{4L} \alpha \operatorname{cth} \alpha \bar{z} . \quad (\text{III. 61})$$

Для фильтров-моделей, которые устанавливаются в фильтрационных лотках и перфорированных трубах, контактирующих с водой, коэффициент истечения жидкости ψ_z и интенсивность притока ω_z можно найти исходя из зависимостей (II. 13) и (II. 14)

$$\psi_z = - \frac{Dv_L}{8\sqrt{2g\Delta h_z}\sqrt{\Delta h_L}} \frac{dh_z}{dz} \text{ и } \omega_z = \frac{8\Delta h_z}{D(dh_z/dz)} . \quad (\text{III. 62})$$

Выводы

1. Влияние скважины на приток жидкости зависит от конструктивных особенностей самой скважины, структуры контактной зоны фильтр — порода и фильтрационных свойств пласта.

Распределение притока вдоль приемной части даже в идеально однородной среде и совершенной по степени вскрытия скважине может быть квазиравномерным или неравномерным в зависимости от значений пара-

метров пласта, скважины и отбора. Влияние отдельных сопротивлений по-разному сказывается на распределении притока. Если фильтрационное сопротивление пласта и гидравлическое сопротивление движению потока через боковую поверхность фильтра уменьшают неравномерность притока, то сопротивления, возникающие вследствие сил инерции и турбулентного трения, увеличивают ее. Степень неравномерности притока определяется отношением полных потерь напора внутри приемной части скважины к потерям напора в пласте в зоне $r_0 \leq r \leq \epsilon m$, которые отмечались бы при плоско-радиальном движении к скважине с нулевым гидравлическим сопротивлением. Если указанные потери соизмеримы, то распределение притока неравномерное.

2. Практически возможно существование двух видов распределения притока — по закону тангенсов или гиперсинусов — в зависимости от граничных условий на внешней стенке скважины. Степень неравномерности притока однозначно характеризуется параметрами притока γ и α , которые рассчитываются исходя из параметров скважины, пласта и отбора. При любом гидравлическом сопротивлении скважины распределение притока не зависит от расстояния до границы пласта и внешних граничных условий, если протяженность пласта $r > \epsilon m$. Для создания квазиравномерного притока при любой интенсивности отбора жидкости скважность фильтра должна быть переменной, причем частота расположения отверстий подчиняется определенному закону.

3. Величина потерь напора и входные скорости монотонно возрастают по длине приемной части, коэффициент турбулентного трения вначале убывает от нулевого сечения до определенной точки, а затем вновь незначительно возрастает или остается постоянным. Диапазон значений коэффициента турбулентного трения широк: от десятков единиц в сечении $z \approx 0$ до величины, в 3 — 4 раза превышающей значения коэффициента гидравлического трения, что связано с максимальной иррегулярностью потока в забойной части, в которой осевая скорость потока близка к нулю, и постепенным уменьшением этой иррегулярности к выходному сечению. Коэффициент турбулентного трения может рассчитываться по предложенным зависимостям при любом законе распределения средней скорости потока по длине приемной части скважины. Потери напора на преодоление сил инерции равны половине скоростного напора. Гидравлическое сопротивление приемной части можно охарактеризовать параметром внутреннего сопротивления F , величина которого пропорциональна отношению полной потери напора к скоростному напору в выходном сечении фильтра.

4. Один из эффективных приемов исследования — совместное рассмотрение аналитического решения дифференциального уравнения при ряде упрощающих допущений и его полного численного решения в виде вычислительного эксперимента. При этом приближенное аналитическое реше-

ние позволяет определить вид искомой функции, а вычислительный эксперимент — ее поведение в широких пределах изменения аргументов и коэффициентов.

Глава IV

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ НЕСОВЕРШЕНСТВО СКВАЖИН

Необходимость разделения эксплуатационных и разведочных скважин на скважины совершенного и несовершенного типа обусловлена, как известно, разницей в дебитах скважин различной конструкции, пробуренных в идентичных гидрогеодинамических условиях и откачиваемых с одинаковым понижением напора. Причем под несовершенной в общем случае понимается такая скважина, приемная часть которой вскрывает пласт не на полную мощность пласта и оборудована водоприемным устройством в виде специального фильтра или перфорированной трубы. Считается, что наличие этих условий или хотя бы одного из них приводит к уменьшению дебита по сравнению со скважиной, пробуренной на полную мощность пласта открытым забоем. Также принимается, что несовершенство скважин может быть учтено введением в расчетные зависимости постоянных по величине коэффициентов дополнительного сопротивления.

Как показали результаты исследований, изложенные в предыдущих главах, указанные выше условия не могут быть приняты в качестве однозначного критерия для отнесения скважин к совершенному или несовершенному типу. В частности, в пластах достаточно большой мощности, которые представлены трещиноватыми породами, при равных понижениях уровня воды скважина, оборудованная перфорированной трубой, может иметь больший дебит по сравнению с необсаженной скважиной ввиду значительных потерь напора на трение в последней. Кроме того, в высокопроницаемых пластах соотношение между дебитами совершенной и несовершенной скважин — переменная величина и зависит от интенсивности водоотбора.

В настоящее время различают два вида несовершенства скважин: по степени и характеру вскрытия. Общее дополнительное гидравлическое сопротивление представляется в виде

$$\xi = \xi_1 + \xi_2,$$

где ξ_1 — безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления, величина которого определяется степенью вскрытия пласта и расположением фильтра относительно его кровли; ξ_2 — безразмерный коэффициент

гидравлического сопротивления, зависящий от характера вскрытия пласта.

Величина ξ_2 считается комплексной характеристикой и дается в виде суммы следующих составляющих:

$$\xi_2 = \xi_{2ф} + \xi_{2п} + \xi_{2н},$$

где $\xi_{2ф}$, $\xi_{2п}$ и $\xi_{2н}$ — соответственно коэффициенты сопротивления, обусловленные наличием фильтра, изменением проницаемости призабойной зоны вследствие бурения и в процессе эксплуатации, отклонением от линейного закона фильтрации.

Аналитические зависимости, графики и таблицы для определения ξ_1 , $\xi_{2ф}$ и $\xi_{2п}$ в случае квазиустановившегося движения приведены в работах [7, 12, 14, 40, 42]. Вопросы методики расчета несовершенных по степени вскрытия скважин освещены в работе В.М. Шестакова, Ю.О. Зеегофера. Решения по притоку жидкости в несовершенную скважину в случаях упругого, упруго-водонапорного и замкнуто-упругого режимов приводятся М.А. Гусейн-Заде. Наиболее полный вывод и анализ решений для случая неустановившейся фильтрации к несовершенной скважине дан А.Л. Хейном и Н.Н. Веригиным. В частности, Н.Н. Веригиным приводится оценка общего скин-эффекта скважины и рассмотрены его отдельные составляющие. В указанных выше работах рассматривался однородный пласт. Решения задач о потенциале несовершенной скважины в однородно-анизотропном и двухслойном однородно-анизотропном радиальных пластах получены Ю.А. Сткляниным. В работе [4] получена величина ξ_1 для слоистого пласта, состоящего из одного основного и одного слабопроницаемого или двух горизонтов, которые разделены слабопроницаемым слоем. Задача фильтрации к скважине в двухслойном напорном пласте рассмотрена Н.Н. Лапшиным. Для этого случая также даны аналитическое выражение и соответствующие таблицы, позволяющие определить коэффициент ξ_1 .

В настоящее время отсутствуют решения для неоднородного пласта, состоящего из произвольного числа кусочно-однородных слоев, т.е. для схемы, более достоверно отображающей естественные гидрогеологические условия, чем схема однородного пласта. Поэтому нахождение приближенных выражений для определения коэффициентов ξ_1 и ξ_2 в случае слоистой толщи и выявление физического смысла этих коэффициентов с учетом гидравлического сопротивления самой скважины представляет существенный интерес. Помимо повышения точности расчета производительности эксплуатационных скважин или понижения уровня в них, установление природы и абсолютных величин дополнительных гидравлических сопротивлений поможет при решении таких вопросов, как интерпретация индикаторных кривых и расходограмм скважин, выбор рационального способа бурения на основе обобщенного показателя сопротивления призабойной зоны, оценка параметров пласта по возмущающей скважине в условиях глубокозалегающих водоносных горизонтов и т.п.

§ 1. СОСТАВЛЯЮЩИЕ ОБЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТА И СКВАЖИНЫ

В соответствии с принципом аддитивности фильтрационных и гидравлических сопротивлений [3, 40, 42] понижение уровня (напора) в пласте и скважине при откачке может быть выражено суммой:

$$S = S_{\text{пл}} + \Delta S, \quad (\text{IV. } 1)$$

где $S_{\text{пл}} = QR/(4\pi km)$ — величина понижения уровня (напора), обусловленная сопротивлением пласта $R/(4\pi km)$ при нулевом гидравлическом сопротивлении скважины и отсутствии деформаций потока в зоне ее расположения; R — безразмерное гидравлическое сопротивление пласта в области фильтрации от ее внешних границ до $r = r_0$ при плоско-радиальном характере движения жидкости в окрестности скважины; ΔS — дополнительное понижение уровня (напора), обусловленное деформацией потока вблизи скважины, в призабойной зоне и самой скважине.

Причины появления добавочных деформаций в реальном потоке по сравнению с идеальным, недеформированным, потоком следующие [12, 14, 15]: нарушение естественной структуры пород и их проницаемости в призабойной зоне при бурении скважины и ее опробовании; устройство гравийной обсыпки; неполное вскрытие пласта приемной частью скважины; обмен количеством движения между частицами основного и присоединяемого потоков в приемной части, а также между частицами основного потока внутри скважины; изменение проницаемости пород в окрестности скважины и на контакте системы фильтр — порода вследствие развития коагуляционных и суффозионных процессов во время эксплуатации скважины; образование пленок, слоя осадка на внешней и внутренней поверхностях фильтра и обсадных труб; образование пробок внутри приемной части скважины в результате осаждения пленок, слоя осадка и вmyваемых частиц породы; турбулизация потока вблизи скважины при превышении скорости движения жидкости в породе некоторого критического значения.

Исследования Н.Н. Биндемана, М.А. Гатальского, Н.К. Гириного, Г.А. Каменского, Г.М. Ломизе и других показали, что в большинстве случаев движение воды у стенки скважины носит ламинарный характер. Следовательно, при существующей интенсивности водоотбора в скважинах, пробуренных в пористых и слаботрещинчатых породах, сопротивление, обусловленное отклонением от линейного закона фильтрации, практически равно нулю и турбулизацией потока можно пренебречь. Проведенные автором эксперименты в круговом фильтрационном лотке с гравийным заполнителем [15] также свидетельствовали, что при $k \approx \approx 6000$ м/сут и отборе $Q = 6,1$ л/с из фильтра диаметром 89 мм и длиной 0,5 м движение воды вплоть до боковой поверхности фильтра ламинарное. При этом закон движения устанавливался по графикам $H = f(\ln r)$, которые были построены по показаниям пяти пьезометров, установленных в гравийном заполнителе.

Несмотря на многообразие причин, деформацию реального потока в пласте и приемной части скважины можно охарактеризовать тремя величинами: коэффициентом фильтрации пород призабойной зоны k_n , интенсивностью притока по мощности пласта dQ/dz и коэффициентом истечения жидкости ψ . Например, нарушение призабойной зоны, устройство гравийной обсыпки, кольматационные и суффозионные процессы приводят к изменению проницаемости пород в призабойной зоне. Это изменение может быть учтено вводом в исходные расчетные зависимости коэффициента фильтрации пород призабойной зоны k_n .

Неполное вскрытие пласта приемной частью скважины и образование внутри нее пробок приводит к деформации линий тока и, как следствие этого, к различной интенсивности притока по мощности пласта. Следовательно, в качестве показателя неполного вскрытия пласта может быть принята величина dQ/dz .

Интенсивность обмена количеством движения между частицами жидкости, движущейся внутри приемной части скважины, и образование пленок, слоя осадка на внутренней поверхности фильтра характеризуется параметром сопротивления приемной части F , что в итоге также сказывается на интенсивности притока dQ/dz .

Образование пленок и осадка на внешней поверхности фильтра уменьшают его скважность η и изменяют коэффициент расхода μ , что может быть учтено коэффициентом истечения жидкости ψ или потерями напора Δh_ψ .

Деформации потока в глухой части фильтра и обсадных трубах характеризуются величиной коэффициента гидравлического трения λ_0 или потерями напора Δh_τ .

Если процессы кольматации, суффозии, образования пробок и пленок устойчивы (непрерывны), то гидравлические сопротивления, обуславливающие соответствующие деформации потока, являются функциями времени. Методика прогноза изменения гидравлических сопротивлений во времени дана Н.Н. Веригиным, В.С. Алексеевым и Г.М. Коммунаром. Методика выявления возможности развития процессов кольматации, суффозии и профилактические меры их предупреждения приведены в работах В.С. Алексеева, А.Ж. Мухтахова и В.И. Фоменко.

Рассмотрим значения гидравлических сопротивлений в выбранный (произвольный) момент времени на стадии квазиустановившегося движения. В этом случае для выделения отдельных составляющих сопротивления и последующего их рассмотрения достаточно составить уравнение, которое включало бы величины S , k_n , dQ/dz , ψ , Δh_τ . Результаты исследований, приведенные в предыдущих главах, позволяют это сделать. Исклечение составляет гидравлическое сопротивление, возникающее при небольшой скважности приемной части, когда фильтр представляет собой перфорированную трубу с малым количеством отверстий (разведочные скважины). Выражение для этого гидравлического сопротивления нельзя

найти на основании ранее полученных зависимостей, так как они выведены в предположении непрерывности потока по длине приемной части. Поэтому дополнительное сопротивление, обусловленное перфорационными отверстиями, следует определять по зависимостям или графикам В.И. Шурова. Как показывают расчеты, потери напора вследствие перфорации приемной части скважины при скважности более 3 – 4 % практически ничтожны и их можно не учитывать для водозаборных скважин. При скважности менее 1 – 2 % учет этих потерь обязателен.

Заменяя в уравнении (II. 44) величину понижения уровня у наружной поверхности приемной части скважины ее значением по (II. 12), получим выражение для понижения уровня в приемной части скважины с учетом ее гидравлического сопротивления

$$S_z = \frac{1}{2\pi k_z} \left(\ln \frac{\epsilon m}{r_0} + \zeta_n + \zeta_\phi \right) \frac{dQ}{dz} \Big|_{z=z} + \frac{Q}{2\pi \bar{k} m} R^{**} + \Delta h \psi(z), \quad (\text{IV. 2})$$

где $\zeta_\phi = f(l_1/D; d/D; nD_n)$ — коэффициент сопротивления, обусловленный перфорацией приемной части скважины, т.е. прерывистостью поступления жидкости через ее боковую поверхность; l_1 — глубина проникновения пули в породу; D_n — наружный диаметр скважины; d — диаметр пули; n — число перфораций (пуль) на 1 м фильтра.

Согласно И.А. Чарному [40], приближенное значение коэффициента сопротивления, обусловленного перфорацией приемной части скважины, можно рассчитать по зависимости В.И. Шурова, представленной в виде

$$\zeta_\phi \approx 8\sigma/(nd),$$

где d — диаметр пули, м; $\sigma \approx 0,10 \div 0,4$ — безразмерный коэффициент, зависящий от углубления пули в породу.

Проводя элементарные преобразования зависимости (IV. 2), получим

$$S_z = \frac{Q}{2\pi \bar{k} m} \left(R + \sum_{i=1}^4 \zeta_i^* \right), \quad (\text{IV. 3})$$

где $\sum_{i=1}^4 \zeta_i^* = \zeta_1^* + \zeta_2^* + \zeta_3^* + \zeta_4^*$ — показатель гидродинамического несовершенства приемной части скважины;

$$\zeta_1^* = \left(\frac{\bar{k} m}{k_z Q} \frac{dQ}{dz} \Big|_{z=z} - 1 \right) \ln \frac{\epsilon m}{r_0}; \quad \zeta_2^* = \frac{\bar{k} m}{k_z Q} (\zeta_n + \zeta_\phi) \frac{dQ}{dz} \Big|_{z=z};$$

$$\xi_3^* = \frac{\bar{k}m}{g\pi(D\psi)^2Q} \left(-\frac{dQ}{dz} \right)^2 \Big|_{z=z}.$$

Так как при выводе исходной зависимости (II. 44) какие-либо ограничения на характер распределения притока не вводились, эта зависимость и полученное из нее выражение (IV. 3) справедливы при любом распределении притока вдоль приемной части скважины.

Как следует из выражения (IV. 3) и результатов исследований, изложенных в гл. II и III, показатель несовершенства приемной части скважины в общем случае — величина переменная, зависящая от дебита, и не может быть представлена в виде суммы постоянных коэффициентов сопротивлений. Помимо скин-эффекта несовершенство приемной части проявляется и в дополнительных потерях напора внутри нее вследствие преодоления сил инерции, тяжести и поверхностных сил.

В соответствии с принципом непрерывности давления понижение уровня (напора) жидкости внутри скважины, которое фиксируется при откачке в эксплуатационной колонне, будет отличаться от понижения уровня у ее наружной стенки на величину потерь напора, обусловленных прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра, его неперфорированную часть и обсадные трубы. Отсюда на основании (IV. 2)

$$S = \frac{1}{2\pi k_L} \left(\ln \frac{em}{r_0} + \xi_n + \xi_\phi \right) \frac{dQ}{dz} \Big|_{z=L} + \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} R^{**} + \quad (IV. 4) \\ + \Delta h_\psi(L) + \Delta h_T.$$

где k_L — коэффициент фильтрации пород в выходном сечении фильтра L .

Переходя к записи понижения уровня внутри скважины в виде суммы коэффициента сопротивления пласта и составляющих гидродинамического несовершенства, получим

$$S = \frac{Q}{2\pi km} (R + \xi^*), \quad (IV. 5)$$

где $\xi^* = \sum_{i=1}^4 \xi_i^* + \xi_T^*$ — суммарный показатель гидродинамического несовершенства скважины; $\xi_T^* = (2\pi \bar{k}m/Q) \Delta h_T$ — параметр сопротивления, учитывающий потери напора в неперфорированной части фильтра и колоннах обсадных труб.

Представление потерь напора в неперфорированной части фильтра и обсадных колоннах в виде составляющей несовершенства скважины не является формальной операцией, так как эти дополнительные потери обусловлены конструкцией скважины, так же и потери, обусловленные степенью и характером вскрытия, а по абсолютной величине могут превышать все остальные в случае глубокого залегания пласта.

§ 2. ПАРАМЕТРЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ И СКВАЖИНЫ

Для определения частных значений и физического смысла отдельных составляющих суммарного показателя гидравлического несовершенства скважины будем считать, что пласт в разрезе однороден. При этом условии выражения для ξ_1^* и ξ_2^* запишутся в виде

$$\xi_1^* = \frac{m}{Q} \left(\frac{dQ}{dz} - \frac{Q}{m} \right) \ln \frac{\epsilon m}{r_0}; \quad (IV. 6)$$

$$\xi_2^* = \frac{m}{Q} (\xi_n + \xi_\phi) \frac{dQ}{dz}. \quad (IV. 7)$$

Согласно выражениям (IV. 6) и (IV. 7) для неравномерного притока параметры гидравлического сопротивления ξ_1^* и ξ_2^* зависят от дебита скважины. При одном и том же дебите параметр ξ_1^* пропорционален разности между интенсивностью притока на единицу длины фильтра и усредненной на единицу мощности пласта. Параметр ξ_2^* при прочих равных условиях пропорционален интенсивности притока и обратно пропорционален скважности приемной части.

Подставляя значения производных функций (III. 14) и (III. 15) в выражения (IV. 6) и (IV. 7), получим зависимости для параметров ξ_1^* , ξ_2^* и ξ_3^* при разных распределениях притока:

$$\xi_1^* = \left(\frac{1}{m} A_z - 1 \right) \ln \frac{\epsilon m}{r_0}; \quad (IV. 8)$$

$$\xi_2^* = \frac{1}{m} A_z (\xi_n + \xi_\phi); \quad (IV. 9)$$

$$\xi_3^* = \frac{k m Q}{9 \pi (D \psi L)^2} A_z^2, \quad (IV. 10)$$

где

$$A_z(\gamma) = \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \gamma} (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma \bar{z}); \quad A_z(\alpha) = \frac{\alpha}{\operatorname{sh} \alpha} \operatorname{ch} \alpha \bar{z}.$$

Из формулы (IV. 8) следует, что при достаточно больших дебитах ξ_1^* является переменной величиной по длине приемной части скважины и принимает как положительные, так и отрицательные значения. Причем вследствие неравномерности притока значение ξ_1^* в выходном сечении фильтра ($z = L$) всегда больше, а в начальном ($z \approx 0$) всегда меньше соответствующего значения ξ_1 , определяемого без учета потерь напора в приемной части скважины. Существует точка, в которой значения

$\xi_1^* = \xi_1$. Из зависимости (IV. 8) также следует, что в скважине, полностью вскрывшей водоносный горизонт без ухудшения фильтрационных свойств призабойной зоны, дополнительные потери напора могут достигать значительной величины и в этом случае такая скважина должна считаться несовершенной.

Считая понижение уровня S_z постоянным по длине приемной части скважины и разделяя переменные k_z и dQ/dz , после интегрирования (IV. 3) от 0 до L получим выражения для $\xi_1^*, \xi_2^*, \xi_3^*$ при незначительном сопротивлении скважины:

$$\bar{\xi}_1^* = \left(\frac{\bar{k}m}{\bar{k}_L L} - 1 \right) \ln \frac{\epsilon m}{r_0}; \quad (\text{IV. 11})$$

$$\bar{\xi}_2^* = \frac{\bar{k}m}{k_L L} \left[\left(\frac{\bar{k}_L}{\bar{k}_n} - 1 \right) \ln \frac{r_{\text{п}}}{r_0} + \frac{8\sigma}{nd} \right]; \quad (\text{IV. 12})$$

$$\bar{\xi}_3^* = \frac{\bar{k}m}{g\pi(DL\psi)^2} Q, \quad (\text{IV. 13})$$

где \bar{k}_L и \bar{k}_n — соответственно усредненные (среднеинтегральные) значения коэффициентов фильтрации пород пласта и призабойной зоны в интервале приемной части.

В отличие от сопротивлений ξ_1^* и ξ_2^* , являющихся параметрами, величины $\bar{\xi}_1^*$ и $\bar{\xi}_2^*$ не зависят от дебита скважины и поэтому могут считаться коэффициентами.

Для апробации приведенных решений проведено сравнение величин коэффициентов гидравлического сопротивления $\bar{\xi}_1$, рассчитанных по зависимости (IV. 11) и формуле Н.Н. Лапшина. Последняя получена для двухслойного пласта путем применения ко всей области фильтрации (без деления на зоны) преобразований Лапласа по переменной t и Ханкеля по переменной r [24]:

$$\bar{\xi}_1 = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \mu_n}{\mu_n^2 (1 + \varphi_1 \sin^2 \mu_n)} K_0 \left(\frac{r}{m_1}, \mu_n \right) \dots, \quad (\text{IV. 14})$$

где μ_n — положительные корни уравнения

$$\alpha \operatorname{ctg} \mu_n + \operatorname{ctg} \mu_n \beta = 0;$$

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1}; \quad \beta = \frac{m_2}{m_1}; \quad \varphi_1 = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha\beta} \frac{\beta}{\alpha};$$

m_1, m_2 — мощности соответственно первого и второго слоев пласта; k_1, k_2 — коэффициенты фильтрации породы соответственно первого и второго слоев пласта.

Кроме того, была выполнена серия экспериментов на электрической модели, имитирующей работу скважины в одно- и трехслойной толщах.

При расчете ξ_1^* по зависимости (IV. 11) коэффициент ϵ согласно экспериментальным исследованиям принимался равным 0,25, так как зона резкой деформации потока по всем опытам приблизительно равна четверти общей мощности возмущаемой толщи (см. рис. II. 3, а). Для удобства расчета зависимость (IV. 11) приводилась к виду

$$2\bar{\xi}_1^* = 2 \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{1}{m_1/m} - 1 \right) \ln \frac{0,25m}{r_0}.$$

Как видно из табл. IV. 1, при $m/r > 150$ и $m > 0,1$ результаты вычислений по обеим формулам довольно близки между собой, и, следовательно, формула (IV. 11) с достаточной для практики точностью отображает зависимость коэффициента ξ_1^* от соответствующих параметров пласта и скважины. Из табл. IV. 1 также следует, что коэффициент ϵ , а значит и гидравлическое сопротивление $R^* = \ln(\epsilon m/r_0)$, при решении прикладных задач (в указанных пределах изменения m/r_0 и \bar{m}) можно считать в первом приближении постоянными величинами независимо от степени вскрытия пласта.

Несмотря на приемлемую сходимость результатов сравнения, проведем уточнение коэффициента ϵ для разных степеней вскрытия пласта и углубления приемной части скважины, так как этот коэффициент в общем случае является функцией вскрытия пласта и отношения его мощности к радиусу скважины.

В качестве исходных примем величины $\bar{\xi}_1$, вычисленные по формуле Н.Н. Веригина при $\bar{c} = 0$ и $\bar{c} \neq 0$:

$$\bar{\xi}_1 = \left(\frac{2}{\pi \bar{m}} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [\sin \pi n (\bar{c} + \bar{m}) - \sin \pi n \bar{c}]^2 K_0 \left(\frac{\pi n r}{m} \right). \quad (\text{IV. 15})$$

Уточненные значения ϵ найдем, исходя из зависимости

$$\epsilon = \exp \left[\frac{\bar{\xi}_1}{2(1 - \bar{m})/\bar{m}} - \ln \frac{m}{r_0} \right],$$

в следующих пределах изменения переменных: $100 \leq m/r_0 \leq 2000$ и $0,1 \leq \bar{m} \leq 0,9$. Результат представлен на рис. IV. 1 в виде среднеинтегральных величин $\bar{\epsilon}$ для каждой степени вскрытия пласта. Согласно приведенным графикам уточненные значения ϵ можно принять равными:

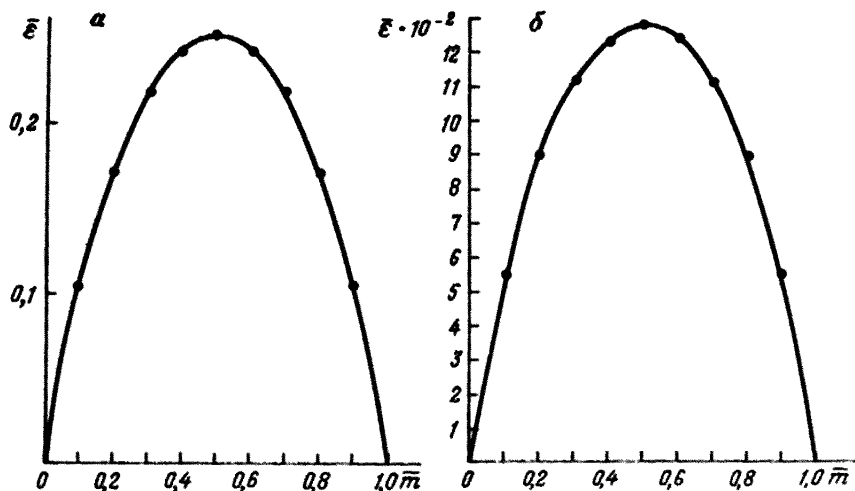


Рис. IV. 1. Зависимость коэффициента $\bar{\epsilon}$ от степени вскрытия пласта:

a — фильтр примыкает к кровле или подошве пласта; *б* — фильтр расположен в середине пласта

при расположении приемной части скважины у кровли или подошвы пласта

$$\bar{\epsilon} \approx \bar{m} (1 - \bar{m}), \quad (\text{IV. 16})$$

при расположении приемной части в середине пласта

$$\bar{\epsilon} \approx 0,5\bar{m}(1 - \bar{m}); \quad (\text{IV. 17})$$

при полном вскрытии пласта приемной частью

$$\bar{\epsilon} \approx 0,25. \quad (\text{IV. 18})$$

Данные сравнения $2\bar{\xi}_1^*$ с $\bar{\xi}_1$ с уточненными значениями ϵ помещены в табл. IV. 2 и IV. 3. При расчете $\bar{\xi}_1^*$ зависимость (IV. 11) приводилась к виду

$$\bar{\xi}_1^* = \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{1}{m_1/m} - 1 \right) \ln \left(1 - \frac{m_1}{m} \right) \frac{m_1}{r_0} \quad \text{и} \quad \bar{\xi}_1^* = \left(\frac{1 - \bar{m}}{\bar{m}} \right) \ln \frac{0,5\bar{m}(1 - \bar{m})}{r_0}.$$

Расхождение между значениями $\bar{\xi}_1^*$ по приближенной зависимости (IV. 11) и формулам (IV. 14) и (IV. 15) несущественно с практической точки зрения (см. табл. IV. 2 и IV. 3), что свидетельствует о возможности использования приближенной зависимости, начиная с отношения $m/r_0 > 150$ и $\bar{m} > 0,1$. При этом значения $\bar{\xi}_1^*$ для многослойной среды могут быть меньше или больше величины $\bar{\xi}_1$ для однородного пласта. Так, если среднее значение коэффициента фильтрации вскрытой части пласта

Сравнение расчетных значений $2\bar{\xi}_1^*$ и $\bar{\xi}_1$ по формулам (IV. 11) и (IV. 14)

Таблица IV. 1

k_2/k_1	m_1/m	m/r											
		30		100		200		500		1000		2000	
		$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$
0,01	0,1	0,363	0,472	0,579	0,685	0,704	0,809	0,869	0,974	0,099	1,010	1,120	1,22
	0,3	0,094	0,413	0,150	0,168	0,182	0,200	0,225	0,243	0,258	0,276	0,290	0,309
	0,5	0,040	0,042	0,064	0,065	0,078	0,079	0,097	0,096	0,110	0,110	0,124	0,124
	0,7	0,017	0,014	0,028	0,024	0,034	0,030	0,041	0,037	0,047	0,043	0,053	0,040
	0,9	0,004	0,002	0,007	0,004	0,009	0,006	0,011	0,007	0,012	0,009	0,014	0,010
0,10	0,1	3,630	4,080	5,790	6,170	7,040	7,400	8,690	9,040	9,939	10,28	11,20	11,5
	0,3	0,940	1,080	1,500	1,630	1,820	1,950	2,250	2,370	2,580	2,700	2,900	3,02
	0,5	0,403	0,421	0,644	0,650	0,782	0,792	0,966	0,964	1,100	1,100	1,240	1,24
	0,7	0,173	0,144	0,276	0,242	0,335	0,299	0,414	0,377	0,473	0,436	0,533	0,495
	0,9	0,045	0,018	0,072	0,041	0,087	0,055	0,107	0,075	0,123	0,090	0,138	0,105
0,25	0,1	9,070	8,740	14,50	13,900	17,600	16,900	21,700	21,000	24,800	24,100	28,000	27,200
	0,3	2,350	2,590	3,760	3,950	4,560	4,750	5,630	5,810	6,440	6,620	7,250	7,430
	0,5	1,010	1,050	1,610	1,620	1,960	1,980	2,410	2,410	2,760	2,750	3,110	3,100
	0,7	0,432	0,377	0,690	0,620	0,838	0,765	1,040	0,960	1,180	1,110	1,330	1,260
	0,9	0,112	0,054	0,179	0,112	0,217	0,148	—	0,198	0,307	0,236	0,345	0,275
0,5	0,1	18,10	14,80	29,00	24,900	35,2	30,900	43,460	39,070	49,700	45,300	55,900	51,500
	0,3	4,700	4,920	7,510	7,620	9,13	9,230	11,270	11,330	12,900	12,900	14,500	14,600
	0,5	2,020	2,100	3,220	3,250	3,91	3,960	4,830	4,820	5,520	5,650	6,200	6,200
	0,7	0,864	0,793	1,380	1,280	1,68	1,570	2,070	1,960	2,370	2,260	2,660	2,540
	0,9	0,224	0,123	0,358	0,244	0,435	0,317	0,536	0,417	0,614	0,494	0,690	0,571
1,0	0,1	36,30	24,50	57,900	44,000	70,4	55,900	86,900	72,100	99,400	84,560	112,000	96,900
	0,3	9,400	9,210	15,000	14,650	18,2	17,800	22,500	22,000	25,870	25,200	29,000	28,430
	0,5	4,030	4,210	6,440	6,500	7,82	7,920	9,300	9,640	11,000	11,000	12,400	12,400
	0,7	1,730	1,690	2,760	2,680	3,353	3,260	4,140	4,040	4,730	4,630	5,330	5,220
	0,9	0,448	0,302	0,715	0,542	0,869	0,689	1,070	0,889	1,230	1,040	1,380	1,200

Таблица IV. 2

Сравнение расчетных значений $2\bar{\xi}_1^*$ и $\bar{\xi}_1$ по формулам (IV. 11) и (IV. 14)

m_1/m	m_1/r	α													
		0,01		0,25		0,50		1,00		2,00		4,00		100,00	
		$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$
0,1	500	0,550	0,584	13,7	15,7	27,5	29,8	55,0	56,6	110	108	220	209	5498	5025
	200	0,467	0,515	11,7	13,6	23,4	25,7	46,7	48,4	93,5	91,8	187	176	4674	4203
	100	0,405	0,462	10,1	12,1	20,2	22,6	40,5	42,2	81,0	79,4	162	152	4050	3582
	20	0,260	0,340	6,50	8,46	13,0	15,5	26,0	28,0	52,0	51,0	104	94,9	2601	2161
	10	0,198	0,288	4,94	6,94	9,89	12,4	19,8	22,0	39,6	39,1	79,1	71,4	1978	1576
0,3	1000	0,153	0,165	3,82	4,01	7,64	7,87	15,3	15,4	30,6	30,2	61,1	59,4	1528	1447
	500	0,137	0,149	3,42	3,60	6,83	7,06	13,7	13,8	27,3	27,0	54,7	53,0	1367	1287
	200	0,115	0,128	2,88	3,07	5,76	6,00	11,5	11,7	23,1	22,7	46,1	44,5	1153	1075
	100	0,099	0,111	2,48	2,67	4,96	5,19	9,91	10,0	19,8	19,5	39,6	38,1	991	916
0,5	2000	0,0691	0,0692	1,73	1,73	3,45	3,46	6,91	6,92	13,8	13,8	27,6	27,7	691	692
	1000	0,0621	0,0623	1,55	1,56	3,11	3,12	6,22	6,23	12,4	12,5	24,9	24,9	622	623
	500	0,0552	0,0554	1,38	1,39	2,76	2,78	5,52	5,54	11,0	11,1	22,1	22,2	552	554
	200	0,0460	0,0463	1,15	1,16	2,30	2,32	4,60	4,63	9,21	9,26	18,4	18,5	460	463
	100	0,0391	0,0394	0,978	0,985	1,96	1,97	3,91	3,94	7,82	7,88	15,6	15,8	391	394
0,7	2000	0,0274	0,0261	0,685	0,666	1,37	1,35	2,74	2,76	5,48	5,65	11,0	11,5	274	296
	1000	0,0244	0,0231	0,611	0,592	1,22	1,20	2,44	2,47	4,89	5,06	9,78	10,3	244	267
	500	0,0215	0,0202	0,537	0,518	1,07	1,06	2,15	2,17	4,30	4,47	8,59	9,14	215	237
	200	0,0175	0,0163	0,439	0,421	0,877	0,863	1,76	1,78	3,51	3,69	7,02	7,58	176	198
	100	0,0146	0,0133	0,364	0,348	0,729	0,716	1,46	1,49	2,92	3,10	5,83	6,40	146	166

Примечание. $L/m_1 = 1$.

Сравнение расчетных значений $2\bar{\xi}_1^*$ и $\bar{\xi}_1$ по формулам (IV. 11) и (IV. 15)

m	m/r									
	100		200		500		1000		2000	
	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$	$2\bar{\xi}_1^*$	$\bar{\xi}_1$
0,1	27,1	32,4	39,6	43,9	56,0	59,8	68,5	72,1	81,0	84,4
0,3	11,0	11,4	14,2	14,6	18,5	18,8	21,7	22,0	25,0	25,2
0,5	5,05	5,17	6,41	6,51	8,27	8,32	9,66	9,70	11,0	11,1
0,7	2,02	2,10	2,61	2,68	3,40	3,45	3,99	4,04	4,58	4,63
0,9	0,334	0,400	0,488	0,542	0,692	0,738	0,846	0,889	1,00	1,04

больше аналогичного значения не вскрытой, то $\bar{\xi}_1^* < \bar{\xi}_1$. В противном случае $\bar{\xi}_1^* > \bar{\xi}_1$.

На основании равенства отношений водопроницаемостей отдельных слоев и расходов, протекающих в этих слоях¹, дополнительный приток из не вскрытой части пласта, обусловленный перетеканием, определяется выражением

$$Q_A = Q \left(1 - \frac{\bar{k}_L L}{\bar{k} m} \right), \quad (\text{IV. 19})$$

а отношение притоков из обеих частей

$$\frac{Q_A}{Q_n} = \left(\frac{\bar{k} m}{\bar{k}_L L} - 1 \right) \text{ или } \frac{Q_A}{Q_n} = \frac{\bar{\xi}_1^*}{\ln(\bar{\epsilon} m / r_0)}, \quad (\text{IV. 20})$$

где Q_n — приток подземных вод из вскрытой части неоднородного пласта.

Согласно (IV. 20) коэффициент $\bar{\xi}_1^*$ пропорционален отношению притоков из основной (вскрытой) зоны и смежных слоев. Отсюда следует, что параметр сопротивления $\bar{\xi}_1^*$ характеризует в общем случае степень вскрытия пласта, его неоднородность, особенности распределения потока в пласте и притока вдоль приемной части скважины.

Параметр $\bar{\xi}_2^*$ и коэффициент $\bar{\xi}_2^*$ также зависят от степени вскрытия пласта. Так, при квазиравномерном распределении притока по длине фильтра в случае однородного пласта из зависимости (IV. 12) следует, что

¹ Данное равенство, строго говоря, справедливо при откачке из скважины, не полностью вскрывшей неоднородный пласт, в случае установившегося движения или квазистационавшегося фильтрации и незначительной разности коэффициентов пьезопроводности отдельных слоев.

$$\zeta_2^* = \frac{1}{\bar{m}} \left[\left(\frac{\bar{k}}{\bar{k}_n} - 1 \right) \ln \frac{r_n}{r_0} + \frac{8\sigma}{nd} \right].$$

На последнее необходимо обратить особое внимание при анализе данных опытных (эксплуатационных) откачек с целью оценки интенсивности кольтматационных процессов, эффективности восстановления производительности скважин и влияния различных способов бурения на фильтрационные свойства околоскважинной зоны.

Таким образом, принятое в настоящее время деление безразмерного гидравлического сопротивления на параметры, обусловленные степенью вскрытия пласта (ζ_1) и характером его вскрытия (ζ_2), нельзя считать удовлетворительным, так как оба эти параметра пропорциональны степени вскрытия пласта. И, следовательно, исходя из сущности этих параметров, их целесообразно объединить в одно безразмерное сопротивление:

в общем случае

$$\zeta_1^{**}(z) = \left(\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \zeta_n + \zeta_\phi \right) \frac{\bar{k}m}{k_z Q} \frac{dQ}{dz} \Big|_{z=z} - \ln \frac{\bar{e}m}{r_0}; \quad (\text{IV. 21})$$

для однородной среды в случае неравномерного притока

$$\zeta_1^{**}(z) = \frac{1}{\bar{m}} A_z \left(\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \zeta_n + \zeta_\phi \right) - \ln \frac{\bar{e}m}{r_0}; \quad (\text{IV. 22})$$

при квазиравномерном притоке

$$\bar{\zeta}_1^{**} = \frac{\bar{k}m}{\bar{k}_L L} \left(\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \zeta_n + \zeta_\phi \right) - \ln \frac{\bar{e}m}{r_0}. \quad (\text{IV. 23})$$

Сопоставление параметров сопротивлений, помещенных в экспликацию к формуле (IV. 3), и формул (IV. 11) — (IV. 13) показывает, что параметр ζ_3^* по своей природе отличается от ζ_1^* и ζ_2^* , и его следует выделить в качестве самостоятельной величины.

Понижение уровня (напора) в приемной части скважины можно окончательно представить в виде

$$S_z = \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} [R + \zeta_1^{**}(z) + \zeta_2^{**}(z)], \quad (\text{IV. 24})$$

а понижение уровня в скважине, обычно фиксируемое при откачке в эксплуатационной колонне,

$$S = \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} [R + \zeta_1^{**}(L) + \zeta_2^{**}(L) + \zeta_3^{**}(L)], \quad (\text{IV. 25})$$

где ζ_1^{**} — параметр сопротивления, обусловленный неоднородностью

пласта в разрезе, неполнотой его вскрытия, потерями напора внутри приемной части скважины, нарушением призабойной зоны в процессе бурения, ее кольматажем или суффозией; $\xi_2^{**} = \frac{\bar{k}m}{g\pi(D\psi)^2 Q} (dQ/dz)^2|_{z=z-}$

параметр, зависящий от типа отверстий приемной части скважины и эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра, $\xi_3^{**} = \frac{2\pi \bar{k}m}{Q} \Delta h_T$ — параметр, характеризующий потери напора в неперфорированной части фильтра и колоннах обсадных труб.

Для однородной среды уравнения (IV. 24) и (IV. 25) запишутся следующим образом:

$$S(z) = \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} \left\{ R + \left[\frac{1}{m} A_z \left(\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \xi_n + \xi_\phi \right) - \ln \frac{\bar{e}m}{r_0} \right] + \frac{kmQ}{g\pi(D\psi L)^2} A_z^2 \right\} \quad (\text{IV. 26})$$

и

$$S = \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} \left\{ R + \left[\frac{1}{m} A_L(\gamma, \alpha) \left(\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \xi_n + \xi_\phi \right) - \ln \frac{\bar{e}m}{r_0} \right] + \frac{kmQ}{g\pi(D\psi L)^2} A_L^2 + \frac{2\pi \bar{k}m}{Q} \Delta h_T \right\}, \quad (\text{IV. 27})$$

где

$$A_L(\gamma) = 2\gamma/\sin 2\gamma \text{ или } A_L(\alpha) = \alpha \operatorname{cth} \alpha.$$

При квазиравномерном притоке, т.е. при малых значениях параметров γ и α , пренебрежении потерями напора, обусловленных малой перфорацией, прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра и трением внутри скважины,

$$\frac{2\gamma}{\sin 2\gamma} \rightarrow 1, \quad \alpha \operatorname{cth} \alpha \rightarrow 1, \quad \frac{kmQ}{g\pi(D\psi L)^2} A_L^2 \rightarrow 0, \quad \Delta h_T \rightarrow 0$$

и (IV. 27) принимает вид

$$S = \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} (R + \bar{\xi}_1^{**}),$$

где

$$\bar{\xi}_1^{**} = \frac{1}{\bar{m}} \left[(1 - \bar{m}) \ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi) \right].$$

§ 3. СРЕДНЕЕ ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ (НАПОРА) И НЕЙТРАЛЬНАЯ ТОЧКА СКВАЖИНЫ

В настоящее время определение производительности водозаборной скважины или проницаемости пласта основывается на использовании формул, не учитывающих влияние гидравлического сопротивления скважины¹. Поэтому известный интерес представляет рассмотрение возможности применения имеющихся формул при существенных потерях напора внутри ее приемной части.

Для однородной толщи при малых потерях напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра ($\xi_2^{**}(z) \rightarrow 0$) формулы, полученные без учета потерь напора внутри приемной части скважины, можно применять при любой неравномерности притока и степени несовершенства скважины по вскрытию пласта, если за понижение уровня (напора) принять среднее понижение по длине приемной части или по всей мощности пласта. В первом случае будут справедливы формулы квазиравномерного притока с соответствующими поправками на несовершенство по степени и характеру вскрытия, при усреднении по всей мощности пласта — формулы с поправкой на нарушение призабойной зоны и скважность приемной части.

Проинтегрировав (IV. 24) с учетом (IV. 21) от 0 до L и от 0 до m , для скважины однородном пласте получим

$$\bar{S}_1 = \frac{a}{2\pi km} (R + \bar{\xi}_1^{**}) \quad \text{и} \quad \bar{S}_2 = \frac{a}{2\pi km} [R + (\xi_n + \xi_\phi)],$$

где $S_1 = \frac{1}{L} \int_0^L S_z dz$ и $S_2 = \frac{1}{m} \int_0^m S_z dz$ — среднее интегральное понижение уровня соответственно в приемной части скважины и по всей мощности пласта при $r = r_0$.

Использование формул квазиравномерного притока в случае неоднородного пласта при наличии существенных потерь напора внутри приемной части несовершенных скважин может привести к существенным ошибкам.

Как показал анализ зависимостей, приведенных в предыдущем и настоящем параграфах, при интенсивной откачке из совершенной скважины в высокопроницаемом пласте понижение уровня воды в забойной части фильтра всегда меньше, чем в его выходном сечении. Причем среднее интегральное понижение при неравномерном притоке равно понижению квазиравномерного притока с тем же дебитом. Следовательно, должна существовать нейтральная точка, в которой приведенное понижение уровня (напора) определяется формулами квазиравномерного притока. Зная ординату этой точки, можно найти понижение уровня в любом

¹ В дальнейшем эти формулы назовем формулами квазиравномерного притока.

другом сечении приемной части или в эксплуатационной колонне скважины. Для этого достаточно к понижению уровня в нейтральной точке прибавить потери напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра и внутри него. Приведенное понижение уровня (напора) в любой точке приемной части, кроме нейтральной, можно записать в соответствии с (IV. 24) :

$$S_{\text{пр}} = S_0 + \Delta h_n + \Delta h_{\psi(z)}, \quad (\text{IV. 28})$$

или

$$S_{\text{пр}} = [S_z - \Delta h_{nz}],$$

где $S_0 = (Q/2\pi km) R$ — понижение уровня в нейтральной точке, равное понижению уровня в совершенной по степени вскрытия скважине при незначительных гидравлических потерях напора в ней; Δh_n — потеря (приращение) напора внутри приемной части от нейтральной точки z_n до рассматриваемого сечения z ; S_z — понижение, фиксируемое внутри приемной части в произвольном сечении z ; Δh_{nz} — потери напора в призабойной зоне.

Согласно (III. 48) и (III. 54) потери (приращение) напора внутри приемной части скважины (перфорированной трубы) в однородной среде определится по зависимостям

$$\Delta h_n = \frac{(F + 16)}{g \pi^2 D^4} (Q_z^2 - Q_{zn}^2); \quad (\text{IV. 29})$$

$$\begin{aligned} \Delta h_n &= \frac{Q^2}{g \pi^2 D^4} (F + 16) \frac{\text{tg}^2 \gamma \bar{z} - \text{tg}^2 \gamma z_n}{\text{tg}^2 \gamma} = \\ &= \frac{Q^2}{g \pi^2 D^4} (F + 16) (\bar{S}_z - \bar{S}_{zn}); \end{aligned} \quad (\text{IV. 30})$$

или

$$\begin{aligned} \Delta h_n &= \frac{Q^2}{g \pi^2 D^4} (F + 16) \frac{\text{sh}^2 \alpha \bar{z} - \text{sh}^2 \alpha z_n}{\text{sh}^2 \alpha} = \\ &= \frac{Q^2}{g \pi^2 D^4} (F + 16) (\bar{S}_z - \bar{S}_{zn}), \end{aligned} \quad (\text{IV. 31})$$

где Q_{zn} — расход в сечении нейтральной точки; z_n — относительная ордината нейтральной точки; S_{zn} — относительное понижение уровня в нейтральной точке.

Для нахождения ординаты нейтральной точки используем зависимость (IV. 3). Учитывая, что в этой точке приведенное понижение уровня равно понижению S_0 , будем иметь

$$\frac{a}{2\pi\bar{k}m} \left(\frac{\bar{k}m}{k_z L} \frac{dQ}{d\bar{z}} - 1 \right) \ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \frac{Q^2}{2g(\pi D\psi L)^2} \left(\frac{d\bar{Q}}{d\bar{z}} \right)^2 = 0.$$

Введем обозначения:

$$\frac{\bar{k}m}{k_z L} \frac{dQ}{dz} = x + 1 = \varphi; \quad \frac{Q^2}{2g(\pi D\psi m)^2} \frac{k_z^2}{k^2} = a; \quad \frac{a}{2\pi\bar{k}m} \ln \frac{\bar{e}m}{r_0} = b.$$

После преобразований получим уравнение второй степени вида $x^2 + (2 + b/a)x + 1 = 0$, решением которого является

$$\varphi = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\left(1 + \frac{b}{2a}\right)^2 - 1}. \quad (\text{IV. 32})$$

Таким образом, для нейтральной точки должно соблюдаться условие

$$\frac{d\bar{Q}}{d\bar{z}} = \frac{k_z L}{\bar{k}m} \varphi \quad \text{или} \quad \frac{dQ}{dz} = \frac{k_z Q}{km} \varphi, \quad (\text{IV. 33})$$

где коэффициент φ определяется по (IV. 32).

Приведенное условие (IV. 33) позволяет найти ординату нейтральной точки при наличии данных расходомерной скважины.

Из выражения (IV. 33) следует ряд частных случаев. Особый интерес с точки зрения выявления физического смысла нейтральной точки представляет случай, если пласт однороден и можно пренебречь потерями напора на прохождение жидкости через боковую (приемную) поверхность фильтра. При этом $\psi \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow 1$ и

$$d\bar{Q}/d\bar{z} = L/m \quad \text{или} \quad dQ/dz = Q/m. \quad (\text{IV. 34})$$

Следовательно, в однородном пласте нейтральная точка находится там, где первая производная относительного расхода внутри приемной части равна степени вскрытия пласта или где первая производная расхода равна средней интенсивности притока, взятой по всей мощности пласта.

Из этого следует, что при квазиравномерном притоке в несовершенную скважину, расположенную у кровли пласта, нейтральная точка находится ниже забойной части фильтра, а для фильтра, расположенного у подошвы пласта, — выше его выходного сечения. При явно выраженном неравномерном притоке нейтральная точка определится как точка касания кривой $\bar{Q} = f(\bar{z})$ или $Q = f(z)$ с линией, параллельной прямой, проведенной из начала координат с угловым коэффициентом $\text{tg } Q_1 = L/m$ или $\text{tg } \theta_2 = Q/m$. При малых степенях вскрытия пласта и неравномерности

притока нейтральная точка может находиться выше или ниже приемной части скважины.

Кроме того, определение нейтральной точки в однородном пласте возможно как по данным замеров давления внутри фильтра, так и по величине параметров притока γ и α .

Из соотношений (III. 53) и (III. 54) после элементарных преобразований получим

$$\frac{1}{2\sqrt{S_z}} \frac{d\bar{S}_z}{d\bar{z}} = \frac{k_z L}{\bar{k} m} \varphi \quad \text{или} \quad \frac{L}{2\sqrt{(S_z - S_0)(S_L - S_0)}} \frac{dS_z}{dz} = \frac{k_z L}{\bar{k} m} \varphi. \quad (\text{IV. 35})$$

Подставляя в выражения (IV. 33) соответствующие значения производных, будем иметь

$$\bar{z}_H = \frac{1}{\gamma} \arccos \sqrt{\frac{\gamma}{\varphi \bar{m} \operatorname{tg} \gamma}} \quad \text{или} \quad \bar{z}_H = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arch} \varphi \bar{m} \frac{\operatorname{sh} \alpha}{\alpha}. \quad (\text{IV. 36})$$

Введение понятия "нейтральная точка" целесообразно при определении понижения уровня (напора) в скважине по имеющимся формулам квазиравномерного притока, интерпретации данных расходометрического каротажа и использования результатов моделирования процесса отбора жидкости на АВМ и ЭЦВМ, выполненного без учета гидравлического сопротивления скважин.

§ 4. ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКВАЖИНЫ И ПЛАСТА ПО ДАННЫМ ОТКАЧЕК ИЗ ОДИНОЧНЫХ СКВАЖИН

В общем случае понижение уровня (напора), фиксируемое в эксплуатационной колонне, зависит от граничных условий пласта, его фильтрационных свойств и дополнительных деформаций потока вблизи скважины, в призабойной зоне и самой скважине. Именно наличием дополнительных деформаций потока объясняются ограниченные возможности определения некоторых гидравлических характеристик пласта и скважины по данным одиночных откачек.

Многообразие факторов, определяющих возникновение деформаций потока, сложность их взаимосвязей с конструктивными элементами скважины и интенсивностью отбора, а также разнородность задач, подлежащих решению, не позволяет дать однозначные рекомендации о необходимости учета или пренебрежения гидравлическим сопротивлением скважины. Определение степени влияния и принятие решения об учете составляющих гидродинамического несовершенства скважин при оценке характеристик скважины и пласта зависит от конечной цели поставленных инженерных задач и требований к точности получаемого результата. Однако следует помнить, что при заложении скважин в глубокозалегающих

горизонтах, высокопроницаемых пористых пластах независимо от глубины заложения и при устройстве приемной части в виде открытого необсаженного ствола в трещиноватых породах достоверность расчетов характеристик скважины и пласта может быть существенно повышена с помощью учета соответствующих гидравлических сопротивлений, который обязателен для высокодебитных скважин.

В последние годы опубликованы работы, в которых рассматриваются различные методы определения гидравлических характеристик по данным откачек из одиночных скважин. Например, У.Винсент, Д. Шарма и Д.Нахм предлагают учитывать влияние гидравлических потерь и нарушения линейного закона фильтрации на характер зависимости понижения уровня от дебита с помощью использования двучленного закона фильтрации

$$S = AQ + BQ^2, \quad (IV. 37)$$

который Д. Нахм преобразует к виду

$$S = b(f + \ln t)Q + bQ^2, \quad (IV. 38)$$

где AQ и BQ^2 — соответственно потери напора в пласте и скважине; B — постоянная, непосредственно характеризующая гидравлическое сопротивление скважины:

$$b = 1/(4\pi km); \quad f = \ln(2,25 a/r^2).$$

Выражение (IV. 38) представляет собой уравнение прямой в координатах (S/Q ; Q), причем B является константой, значение A — параметром по отношению ко времени t , т.е. постоянной лишь для одного и того же момента времени с начала откачки.

Предложенный Д. Нахмом метод определения водопроводимости km , пьезопроводности a и постоянной гидравлических потерь напора в скважине B заключается в проведении многократных откачек при постоянном дебите Q с полным восстановлением уровня после каждой откачки, фиксации понижения уровня при всех откачках в одни и те же моменты времени и последующем расчете коэффициентов km , a и B на основании графика $S/Q = f(Q)$ и приведенных зависимостей, полученных на основе регрессионного анализа.

Рассмотрим принципиальные возможности предлагаемого метода многократных откачек.

Для однородного пласта и при допущении пропорциональности потерь напора в обсадных колоннах квадрату расхода уравнение (IV. 27) можно записать в виде

$$S/Q = A_1 + B_1 Q, \quad (IV. 39)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{1}{2\pi km} \left[\left(\ln \frac{2,25a}{r^2} + \ln t \right) + \frac{1}{m} A_L \left(\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \xi_n + \xi_\phi \right) - \ln \frac{\bar{e}m}{r_0} \right];$$

$$B_1 = \frac{A_L^2}{2g(\pi D \psi_L)^2} + \sum_{i=1}^n \frac{8\lambda}{g\pi^2 D_i^5} l_i;$$

$$A_L(\gamma) = \frac{2\gamma}{\sin 2\gamma} \quad \text{или} \quad A_L(\alpha) = \alpha \operatorname{cth} \alpha.$$

Как видно из экспликации к (IV. 39), определение km , a и B_1 по методу многократных откачек возможно, если потери напора вследствие нарушения призабойной зоны Δh_s , внутри приемной части Δh_L и потери, обусловленные прохождением жидкости через боковую поверхность фильтра, $\Delta h_{\psi(L)}$ малы. При этом из соотношения

$$\lambda = B_1 / \sum_{i=1}^n \frac{8l_i}{g\pi^2 D_i^5} \quad (\text{IV. 40})$$

получим среднюю приближенную величину коэффициента гидравлического трения обсадных колонн.

Расчет проводимости пород и гидравлического сопротивления обсадных колонн рассмотренным методом многократных откачек невозможен, если значения указанных выше потерь напора достаточно велики. В данном случае A_1 и B_1 — переменные, так как коэффициенты A_L пропорциональны величинам γ и α , зависящим, в свою очередь, от дебита скважины, который на каждой ступени откачки различен.

Кроме того, данные разовой откачки из одиночной скважины позволяют рассчитывать коэффициент проводимости пород при любых гидравлических сопротивлениях. Действительно, при постоянстве дебита в процессе опытной откачки параметры притока γ и α постоянны и уравнение (IV. 27) можно представить следующим образом:

$$S = A_2 + \frac{a}{4\pi km} \ln t,$$

где A_2 — постоянная.

Согласно этому выражению значительное гидравлическое сопротивление скважины не влияет на точность определения общей водопроводимости пласта, если последняя рассчитывается с помощью графоаналитического

метода по формулам неустановившегося движения исходя из зависимости $S = f(\ln t)$.

При использовании предложенных зависимостей данные откачки из одиночной скважины и расходометрический каротаж также позволяют более достоверно судить и о наличии зоны турбулентного режима вблизи скважины, что имеет существенное значение при анализе формы индикаторных диаграмм $S = f(Q)$ или $\Delta P = f(Q)$ и выявлении причин их искривления.

Как известно, необходимое условие существования двучленного закона фильтрации в напорных пластах — нелинейность зависимости между дебитом скважины и понижением уровня. Однако соблюдение только этого условия следует считать недостаточным: зависимость $S = f(Q)$ может выражаться кривой, хотя движение жидкости в породе вплоть до стенки скважины носит ламинарный характер. В этом случае нелинейность зависимости $S = f(Q)$ обуславливается потерями напора в фильтре и обсадных трубах. Учет последних приобретает особенно важное значение в связи с ростом объема бурения глубоких скважин и общей тенденцией к уменьшению диаметра скважин и числа промежуточных колонн. Для определения закона движения жидкости вблизи скважины в замеренные во время откачки величины понижений необходимо ввести поправки на потери напора в фильтре и колоннах обсадных труб. Если зависимость приведенного понижения $S'' = [S - (\Delta h_n + \Delta h_{\psi(L)} + \Delta h_t)]$ от дебита Q выражается кривой, то это свидетельствует о нарушении линейного закона фильтрации в призабойной зоне.

По мнению автора, которое основано на материалах ряда исследований и собственных экспериментов (см. § 1 настоящей главы), криволинейность фактических индикаторных диаграмм водозаборных скважин обусловлена в основном потерями напора в фильтре и колоннах обсадных труб. Появляющиеся сообщения о фиксации явления нарушения линейного закона фильтрации при нагнетаниях и откачках не могут считаться достоверными без оговорки о проведенной оценке гидравлического сопротивления скважины. Для нефтяных скважин интерпретацию индикаторных диаграмм также следует проводить с учетом потерь напора в приемной части скважины и колоннах обсадных труб, хотя помимо этого на форму диаграмм влияют процессы снижения фазовой проницаемости в призабойной зоне при снижении забойного давления ниже давления насыщения, сжимаемость пласта и изменение свойств жидкости при изменении давления.

Кроме того, определенный интерес представляет рассмотрение возможностей непосредственного использования данных одиночных откачек при изучении взаимосвязи форм рельефа и водоносности пород и оценке зависимости водопроницаемости отложений от их структурного положения, чему посвящен ряд работ как за рубежом, так и в СССР. Подобное внимание к выявлению связи между проницаемостью пород, рельефом

местности и структурным положением водовмещающей толщи помимо научного интереса вызвано как нуждами региональной оценки ресурсов подземных вод, так и необходимостью приближенной оценки возможных притоков в горные выработки на стадии составления технико-экономического доклада и плана очередности освоения продуктивных толщ на крупных месторождениях твердых полезных ископаемых.

Согласно опубликованным данным полученные на основании величин удельных дебитов и удельной приемистости скважин зависимости во всех случаях подтверждали существенное уменьшение проницаемости пород с глубиной и меньшую водообильность на повышенных участках рельефа по сравнению с пониженными. Хотя с общей тенденцией снижения проницаемости пород от поверхности к глубине следует согласиться, все же при выявлении изменений фильтрационных свойств пород по площади и в разрезе следует учитывать, что водообильность скважины также зависит от ее конструкции. Поэтому повышенная водообильность скважин на участках наиболее близкого залегания пласта к земной поверхности не всегда свидетельствует о большей его проницаемости в этих местах даже при близких значениях конечных диаметров сравниваемых скважин. Зависимость удельного дебита и удельной приемистости от ее конечного диаметра в общем случае неоднозначна, так как при одних и тех же диаметрах и длинах фильтровой части удельный дебит существенным образом зависит от нарушений в призабойной зоне, степени вскрытия пласта, длины глухой части фильтра, диаметра и длины обсадных колонн. Причем эта зависимость однозначна только при малых потерях напора в призабойной зоне и самой скважине. Величина удельного дебита характеризует как фильтрационные свойства пород, так и призабойную зону и конструктивные особенности скважины. Следовательно, в общем случае использование величины удельного дебита в качестве критерия водопроницаемости пород неоправданно. Особенно важен хотя бы грубый учет гидравлического сопротивления скважины при региональных обобщениях большого числа откачек из эксплуатационных скважин, пробуренных ранее, когда опробование сводилось к установлению величины удельного дебита, а значение водопроницаемости не определялось.

Выводы

1. Гидродинамическое несовершенство скважины однозначно определяется деформацией потока в околоскважинной области и внутри самой скважины. Чем значительнее деформация потока, а следовательно, и дополнительные потери напора, тем больше степень несовершенства скважины. Таким образом, под совершенной скважиной следует понимать такую, для которой дополнительные потери напора вследствие деформации потока в пласте, призабойной зоне, на стенке скважины и внутри приемной

части практически ничтожны по сравнению с расчетной потерей напора при плоско-радиальном движении потока от внешних границ области фильтрации до стенки скважины. Факт полного вскрытия пласта и отсутствия фильтра в стволе скважины недостаточен для отнесения скважины к совершенному типу, так как при интенсивном отборе потери напора внутри приемной части могут составлять существенную часть от общего понижения уровня воды в скважине. В случае соизмеримости дополнительных потерь напора с потерями при плоско-радиальном движении скважина может считаться несовершенной. С точки зрения гидравлики необсаженная скважина, вскрывшая высокопроницаемый пласт на всю мощность, может оказаться более несовершенной, чем скважина, оборудованная фильтром на не полную мощность пласта и отбирающая меньшее количество воды.

2. Необходимыми условиями существования деформации потока в околоскважинной области, или характерными признаками, достаточными для отнесения скважины к несовершенному типу, являются неполное вскрытие пласта и его неоднородность в разрезе, нарушение призабойной зоны, наличие фильтровой колонны и интенсивный отбор воды из скважины. Скважина может быть отнесена к несовершенному типу как по совокупности указанных признаков, так и при фиксации лишь одного из них.

Гидродинамическое несовершенство скважин можно охарактеризовать двумя безразмерными коэффициентами — ξ_1^{**} и ξ_2^{**} . Коэффициентом ξ_1^{**} определяются дополнительные потери напора, которые зависят от полноты вскрытия пласта и его неоднородности, степени нарушения призабойной зоны и особенностей распределения притока вдоль приемной части скважины. Ввиду значительной зависимости параметра ξ_1^{**} от отношения общей проводимости пласта к проводимости вскрытой части проектирование рациональных конструкций скважин невозможно без учета неоднородности пласта. В общем случае параметр ξ_1^{**} меняется по длине приемной части и может принимать как положительные, так и отрицательные значения, оставаясь пропорциональным разности между фактической интенсивностью притока на единицу длины фильтра и осредненной на единицу мощности пласта. Максимальное значение параметра отмечается у выходного сечения приемной части. При квазиравномерном распределении притока по длине параметр ξ_1^{**} прямо пропорционален отношению расходов из основной (вскрытой) зоны и смежных слоев.

Параметром ξ_2^{**} определяются потери напора вследствие прохождения потока через боковую поверхность приемной части. Эти потери зависят от конструкции фильтровой колонны и эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра. Величина параметра переменна по длине фильтра и всегда положительна. Максимальное значение параметра — у выходного сечения приемной части.

3. Для достоверного определения параметров ξ_1^{**} и ξ_2^{**} в натурных

условиях необходимо кроме стандартных методов гидрогеологического опробования использовать методы пьезорасходомерии скважин, так как лишь в этом случае могут быть с необходимой точностью установлены исходные параметры dQ/dz , γ , ψ и др.

4. При значительном сопротивлении скважины и, как следствие этого, неравномерности притока по длине ее приемной части в пределах последней существует нейтральная точка, понижение уровня (напора) в которой равно понижению, рассчитанному по формулам квазиравномерного притока. В этом случае понижение уровня в любом сечении приемной части скважины можно представить в виде суммы понижения уровня воды при пренебрежении гидравлическим сопротивлением скважины и потерь напора внутри приемной части от нейтральной точки до рассматриваемого сечения z .

Глава V

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Для выявления особенностей притока жидкости в скважину и апробации полученных аналитических решений были проведены экспериментальные исследования на гидравлических установках.

Учитывая, что прямой перенос данных гидравлической модели на реальный пласт иногда затруднен ввиду нарушения геометрического подобия систем фильтр — лоток и пласт — скважина, специальные опытно-фильтрационные работы проводились и в натурных условиях. Цель работ состояла в получении экспериментального материала по фактическому распределению потерь напора и апробации предложенных зависимостей в условиях однородного пласта.

§ 1. ГИДРАВЛИКА ФИЛЬТРА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С ВОДНОЙ СРЕДОЙ

При оценке потерь напора в фильтра существенное значение имеют вопросы истечения жидкости через приемные отверстия.

Как известно, наиболее общий показатель особенностей истечения — коэффициент расхода отверстия, определению которого посвящено много работ. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования главным образом касались вопроса истечения жидкости в атмосферу. В частности, А.Д. Альтшулем даны обобщенные зависимости для расчета коэффициента расхода при истечении жидкостей через одиночные отверстия в тонкой стенке. На основании экспериментальных данных В.И. Геллер и Ю.А. Скобельцин получили формулы для коэффициента расхода при истечении жидкости через цилиндрические насадки. Истечение

затопленных струй в цилиндрическую трубу и из нее исследовали С.К. Абрамов, Г.В. Донской, А.И. Егоров, И.М. Миркис.

Характер изменения коэффициента расхода μ по длине перфорированной трубы рассматривался в основном при исследовании закономерностей истечения воды и воздуха из трубчатых распределителей [18, 33]. При этом отмечалось изменение μ по длине распределителя. Однако указанный процесс существенно отличается от процесса притока воды в фильтр (перфорированную трубу). Достаточно упомянуть о таком явлении, как восстановление напора в "коротком" распределителе, чего не наблюдается в любых "сверхкоротких" фильтрах-сборниках. В распределителях струи под влиянием сил инерции вытекают из отверстий под острым углом, величина которого меняется вдоль потока. При сборе воды струи входят в приемную часть практически под прямым углом [8, 30, 36]. Кроме того, если коэффициент расхода в распределителях воды — функция скорости потока, отношения толщины стенки и диаметра трубы к диаметру отверстия, то в фильтрах скважины этот коэффициент существенно зависит от вида приемной поверхности и поровой структуры породы, прилегающей к фильтру.

Для определения коэффициента расхода при истечении воды через одиночное отверстие, а также через систему затопленных отверстий было проведено 60 опытов.

Экспериментальная установка состояла из лотка прямоугольного сечения размерами 1,75x0,80x0,95 м, в котором устанавливался алюминиевый лист толщиной 0,75 мм с проштампованными отверстиями диаметром 5 мм (рис. V. 1). Всего было проштамповано 59 отверстий на площади 29,68 см². С целью получения коэффициента расхода при меньшем количестве отверстий на проштампованную площадь наклеивали полихлорвиниловую пленку. Затем по мере необходимости прожигали нужное число отверстий. Давление в отсеках лотка регистрировали с помощью 12 пьезометров, выведенных на общий щит.

Коэффициенты расхода одиночных отверстий подсчитывали по зависимости

$$\mu = \frac{Q_0}{W \sqrt{2g \Delta H}}, \quad (V. 1)$$

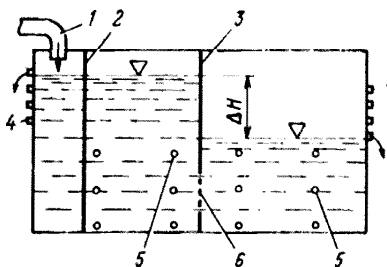


Рис. V. 1. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента расхода отверстий:

1 — подводный трубопровод; 2 — гаситель (перфорированный лист); 3 — алюминиевый лист; 4 — сливные патрубки; 5 — пьезометры, стрелками обозначены линии тока воды; 6 — отверстия в листе

где Q_0 — расход через отверстие; ΔH — разность уровней в отсеках лотка.

Согласно экспериментам коэффициенты расхода при $\Delta H = 0,06 \div 0,44$ м ($2,3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1,5 \cdot 10^4$) находились в пределах $0,688 \leq \mu \leq 0,714$. Абсолютное значение коэффициента расхода возрастало по мере увеличения разности уровней в отсеках лотка.

Для выявления изменения коэффициента расхода единичного отверстия в зависимости от числа одновременно работающих отверстий были проведены опыты по истечению воды через систему симметрично расположенных отверстий. При проведении опытов по истечению воды через 59 отверстий начиная с $Q = 2,08$ л/с методом подкрашивания струй фиксировалось резкое возмущение струйности потока благодаря течению воды в направлении стенка лотка — отверстие. Замеренный общий расход $Q_{\text{общ}}$ приводился к расходу единичного отверстия Q' делением его величины на количество отверстий n ($Q' = Q_{\text{общ}}/n$). Из рис. V. 2, а следует, что по мере увеличения числа отверстий возрастает коэффициент расхода единичного отверстия. Подобное явление однозначно объясняется влиянием эффекта несовершенства сжатия струи, что подтверждает зависимость приведенного единичного расхода системы

отверстий $Q'' = \frac{Q_{\text{общ}}}{n(1 + k_\mu \mu)}$ от разности уровней в отсеках лотка (рис.

V. 2, б). Из рис. V. 2, б' видно, что с введением поправочного коэффи-

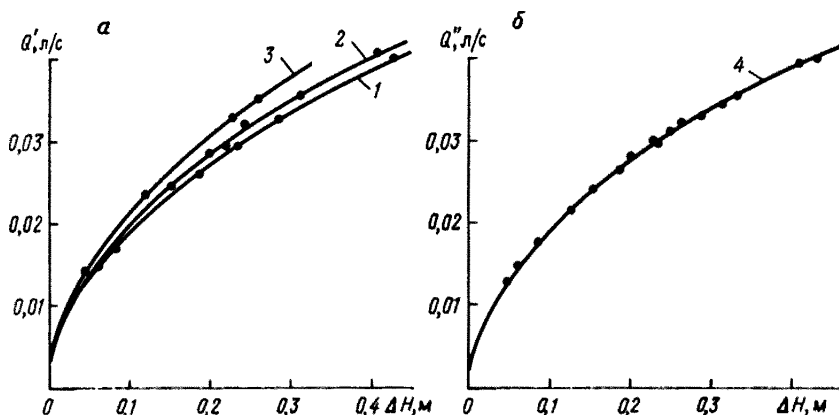


Рис. V. 2. Зависимости фактического (а) и приведенного (б) расхода единичного затопленного отверстия от разности уровней в отсеках лотков:

1 — $n = 1$, совершенное сжатие; 2 — $n = 23$, $\eta = 15,21$ %; 3 — $n = 59$, $\eta = 39,01$ %; 4 — $n = 1$; 23; 59

циента на несовершенство сжатия струи $k_\mu = f(w/\Omega)$ все опытные точки независимо от числа отверстий ложатся около одной кривой. Отсюда по аналогии с истечением воды через одиночное отверстие, ограниченное твердыми стенками, примем, что в случае симметрично-равномерного расположения отверстий коэффициент расхода при несовершенном сжатии струи можно определить по формуле (по А.М. Латышенкову и В.Г. Лобачеву)

$$\mu_{н.с} = \mu(1 + k_\mu), \quad (V. 2)$$

где μ — коэффициент расхода в условиях совершенного сжатия.

Помимо закономерностей изменения коэффициента расхода системы затопленных отверстий изучалось влияние местных гидравлических сопротивлений на истечение воды через одиночное затопленное отверстие.

Перед одиночным отверстием устанавливали латунную сетку на расстояниях $l = 0,1, 2, 5$ мм. Это достигалось напавиванием проволочных колец с латунной сеткой на пластину с отверстием. Сквозность сетки составляла 31,2%, площадь прямоугольного отверстия сетки $w = 0,087$ мм², толщина проволоки $d_n = 0,23$ мм. При исследовании рассматриваемого явления использовались результаты 51 опыта.

На основании экспериментальных данных была получена полуэмпирическая зависимость для расхода воды при истечении через одиночное отверстие, окруженное сеткой,

$$Q_0 = 0,707 w \sqrt{2g \Delta H} \operatorname{th} \sqrt[0,5]{2l/d} \quad (V. 3)$$

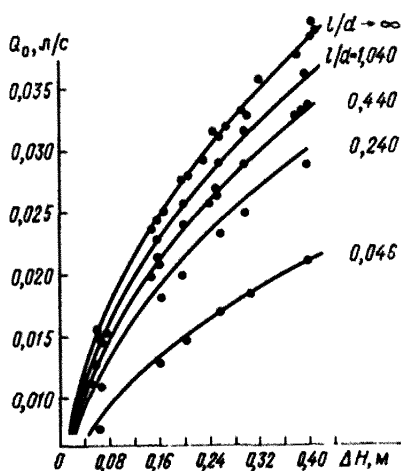


Рис. V. 3. Зависимость расхода через одиночное отверстие, окруженное сеткой, от разности напора

и построены графики $Q_0 = f(\Delta H)$ (рис. V. 3), из которых видно, что опытные точки близко ложатся к соответствующим теоретическим кривым, вычисленным по зависимости (V. 3), и, следовательно, эта зависимость справедлива для рассматриваемого процесса истечения воды.

Сравнивая (V. 3) с формулой расхода одиночного отверстия (V. 1) нетрудно убедиться, что коэффициент расхода при наличии гидравлического сопротивления в виде сетки равен

$$\mu_c = \mu \operatorname{th} \sqrt[0,5]{2l/d}, \quad (V. 4)$$

где $\mu = 0,707$ — значение коэффициента расхода через одиночное затопленное отверстие, полученное методом анализа размерностей [15]

По зависимости (V. 4) подсчитаны средние значения коэффициента расхода при различных расстояниях сетки / от отверстия диаметром d :

l/d	∞	1,04	0,44	0,24	0,05
μ_c	0,707	0,696	0,594	0,472	0,213

Приведенные данные свидетельствуют о незначительном влиянии гидравлического сопротивления сетки на коэффициент расхода при ее удалении на расстояние d . С приближением сетки к отверстию гидравлическое сопротивление возрастает и минимальный коэффициент расхода отверстия (сетка наложена вплотную на отверстие) составляет 0,3 от коэффициента расхода отверстия без сетки.

Анализируя зависимости (V. 2) и (V. 4), можно сделать вывод, что коэффициент расхода — чувствительный показатель всякого рода деформаций потока, возникающих у отверстия. Любая упорядоченная деформация потока, т.е. деформация, вызываемая определенными постоянно действующими сопротивлениями, влияет на величину коэффициента расхода. Более того, как показывают зависимости (V. 2) и (V. 4), по характеру изменений коэффициента расхода можно определить вид и интенсивность соответствующих деформаций. Результаты опытов позволяют считать, что наличие местных гидравлических сопротивлений не меняет структуры общей формулы расхода воды через отверстие. Сопротивления влияют лишь на величину коэффициента расхода. Так, например, истечение через одиночное отверстие, отверстие, окруженное сеткой, и систему отверстий выражается единой зависимостью $Q = \mu w \sqrt{2g \Delta H}$, в которой по значению μ можно определить вид и степень деформации потока.

Для установления закона распределения пьезометрических напоров по длине приемной части было проведено 24 опыта на фильтрах с наружным диаметром 89 мм и толщиной стенки 4 мм. В первой серии опытов фильтр помещали в лоток с водой (рис. V. 4). Водоприемная часть опытного фильтра представляла собой перфорированную стальную трубу длиной 0,468 м. Круглые проходные отверстия диаметром 5 мм располагались в шахматном порядке. На перфорированную часть фильтра наклеивалась полихлорвиниловая пленка. Затем симметрично относительно центрального сечения фильтра прожигалось необходимое число отверстий.

Уровень воды в лотке замерялся с помощью 11 пьезометров, пять из которых регистрировали уровень воды внутри фильтра. Пьезометры фильтра находились на расстояниях $z = 8,3; 17,9; 27,4; 37,2$ и $46,8$ см от нижней части фильтра. Расходы воды во время опытов составляли 0,18 — 3,10 л/с, скважность фильтров 0,23; 0,83 и 1,65 %. Экспериментальные данные для фильтров с более высокой скважностью (7 опытов) были заимствованы из работы [48], в котором описывался фильтр наружным диаметром 76,8 мм, толщиной стенки 0,5 мм, длиной 0,305 — 1,22 м и отверстиями диаметром 3,2 мм, скважность фильтра составляла 4,93 и 19,71 %.

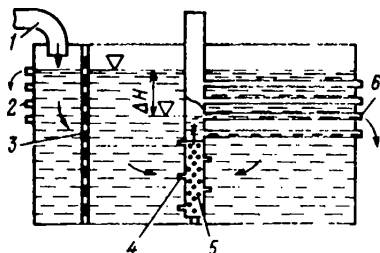


Рис. V. 4. Схема экспериментальной установки для определения гидравлических характеристик фильтра при контакте с водной средой:

1 — подводный трубопровод; 2 — сливные петрубки; 3 — гаситель (перфорированный лист); 4 — пьезометры для замера давления внутри фильтра; 5 — фильтр; 6 — трубки для отвода воды из фильтра; стрелками обозначены линии тока воды

На основании экспериментальных данных и расчетов по (III. 39) было проведено сравнение фактической и вычисленной разностей напоров внутри фильтра в различных его сечениях [15]. При расчете коэффициента истечения жидкости $\psi = \mu\eta$ коэффициент расхода принимался постоянным по длине фильтра и определялся по графику $\mu = f(\eta)$, приведенному в работе [15]. Результат сравнения помещен ниже.

Интервалы отклонений расчетных величин $\Delta h \psi(z)$ от фактических, %

Число наблюдений	0 — 2,5	2,5 — 5,0	5,0 — 7,0	7,0 — 10,0	> 10,0
m	25	55	25	24	23
Частота m/n	0,165	0,362	0,164	0,158	0,151

При этом общее число наблюдений $n = 152$.

Эти данные позволяют считать, что зависимость (III. 39) для $\Delta h \psi(z)$ в широком диапазоне скважности (0,23 — 19,71 %) достаточно достоверно описывает закономерности притока воды в фильтр по всей ее длине. Следовательно, по указанной зависимости можно вычислить соответствующие разности пьезометрических уровней фильтра, находящегося в контакте с водной средой.

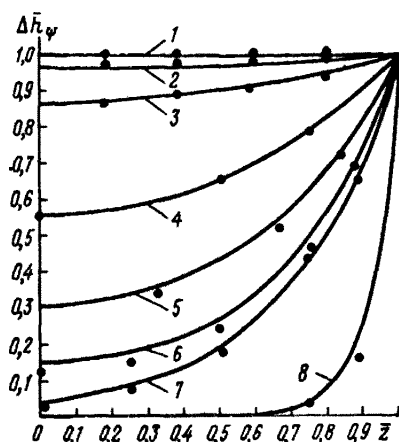
Исходя из значений коэффициента истечения жидкости, длины и диаметра фильтра, по (III. 20) были рассчитаны параметры распределения притока α . Ввиду "короткости" фильтров параметр внутреннего сопротивления приемной части F принимался равным нулю. Параметры фильтра и расчетные значения α следующие:

η , %	0,23	0,83	1,65	4,93	4,93	4,93	4,93	19,71
ψ	0,0016	0,0059	0,0117	0,0351	0,0351	0,0351	0,0351	0,1439
L , м	0,468	0,468	0,468	1,219	0,610	0,457	0,305	1,219
D , м	0,0810	0,0810	0,0810	0,0758	0,0758	0,0758	0,0758	0,0758
α	0,0523	0,1930	0,3820	3,1940	1,5980	1,1970	0,7990	13,0900

По зависимости (III. 55) в соответствии с приведенными значениями α рассчитывались теоретические кривые функции относительной разности уровней снаружи и внутри фильтра $\Delta \bar{h} \psi(z) = f(\bar{z})$. По опытным данным

Рис. V. 5. График изменения относительной разности уровней снаружи и внутри фильтра $\Delta \bar{h}_\psi(z) = f(\bar{z})$:

1 - $\alpha = 0,0523$; 2 - $\alpha = 0,193$; 3 - $\alpha = 0,382$; 4 - $\alpha = 0,799$; 5 - $\alpha = 1,197$; 6 - $\alpha = 1,598$; 7 - $\alpha = 3,194$; 8 - $\alpha = 13,090$



находились значения фактической относительной разности уровней $\Delta \bar{h}_\psi(z) = \Delta h_\psi(z) / \Delta h_\psi(L)$ в различных сечениях фильтра.

В соответствии с рис. V. 5 экспериментальные точки ложатся на теоретические кривые. Закономерное отклонение отмечается лишь для двух опытов (рис. V. 5, кривые 5 и 6). Совпадение эксперимента с данными расчета подтверждает справедливость зависимостей (III. 20), (III. 55) и принятого допущения о постоянстве коэффициента истечения жидкости ψ по длине фильтра. Учитывая, что зависимость (III. 55) получена при условии $\bar{Q} = \text{sh} \alpha \bar{z} / \text{sh} \alpha$, можно сделать вывод о достоверности результатов § 2 гл. III, согласно которым распределение средних скоростей потока в фильтрах-моделях и реальных скважинах (для некоторых частных случаев) подчиняется закону гиперсинусов. При малых значениях ψ потери напро на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра являются величиной постоянной по длине фильтра (см. рис. V. 5, кривая 1).

Анализ экспериментальной зависимости $\Delta h_\psi(z) = f(z)$ позволил также прийти к заключению о существовании определенной для данной длины и диаметра фильтра скважности, начиная с которой дальнейшее увеличение скважности не приводит к уменьшению потерь напро на прохождение жидкости через боковую поверхность приемной части фильтра. Из (III. 39) для конечного сечения фильтра, т.е. при $z = 1$, имеем

$$\Delta h_\psi(z) = \frac{\alpha_L^2}{g w^2} (1 + F^*) \text{cth}^2 \alpha. \quad (\text{V. 5})$$

Согласно (V. 5) с увеличением отношения $\psi L / D$ величина второго ее сомножителя асимптотически приближается к единице и при $\psi L / D \geq 0,53$ становится практически равной единице. Принимая $\psi L / D = 0,53$,

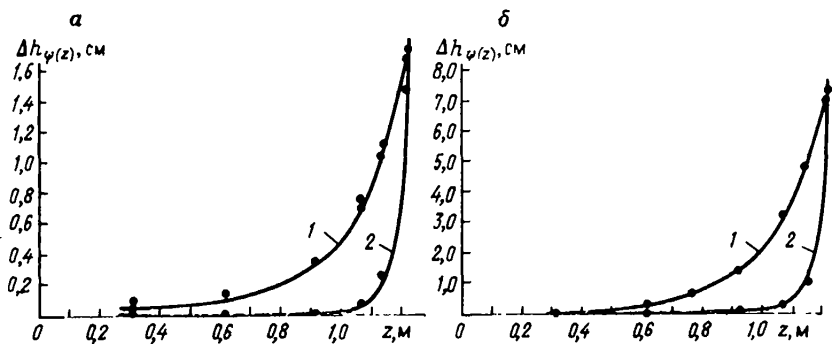


Рис. V. 6. График изменения разности пьезометрических уровней снаружи и внутри фильтра:

а — $Q = 1,74$ л/с; б — $Q = 3,54$ л/с; 1 — $\eta = 4,93$ %; 2 — $\eta = 19,71$ %

получим приближенное выражение для определения оптимальной скважности:

$$\eta = 0,53D/(\mu L). \quad (V. 6)$$

Например, при $L = 1,219$ м, $D = 0,0758$ м и $\mu = 0,73$ согласно (V. 6) оптимальная скважность 4,51 %. Увеличение скважности с 4,93 до 19,71 % (рис. V. 6) не привело к уменьшению потерь напора $\Delta h_{\psi(L)}$, т.е. к уменьшению разности между уровнями за стенкой фильтра и внутри него. Существование оптимальной скважности обусловлено тем, что движение жидкости через проходные отверстия фильтра сопровождается явлениями сжатия струи и смешения присоединяемых частиц с основным потоком. Чем больше скважность, т.е. чем сильнее выражено несовершенство сжатия струи, тем больше расход через отверстия фильтра. В отсутствие других факторов увеличение скважности непрерывно вело бы к повышению расхода фильтра при тех же потерях напора. Однако с увеличением скважности растут потери энергии на смешение масс присоединяемых частиц и основного потока. Поэтому существует предельная величина, при которой возрастание расхода единичных струй компенсируется потерей энергии в результате более интенсивного смешения масс присоединяемых частиц и основного потока.

Для проверки условия (III. 30), выполнение которого обеспечивает равномерное (по объему) поступление воды в фильтр вдоль его длины, проводились опыты в круговом фильтрационном лотке. Длина приемной части фильтра-модели $L = 0,5$ м, внутренний диаметр $D = 0,048$ м. Переменная по длине фильтра скважность рассчитывалась по зависимости (III. 30) при начальной скважности $\eta = 10$ % и коэффициенте расхода отверстий $\mu = 0,8$. В соответствии с расчетом просверливалось разное

число отверстий по длине фильтра. Диаметр отверстий $d_o = 2$ мм, общее число отверстий $n = 1144$, общая скважность фильтра составляла $\eta = 4,78\%$, скважность в конечном сечении $\eta_L = 2\%$. Скорость потока внутри фильтра измерялась микровертушкой X-6. Проведенные эксперименты подтвердили надежность условия (III. 30). Из рис. V. 7 видно, что при всех дебитах интенсивность притока dv/dz — величина постоянная по длине фильтра. Если бы при той же общей скважности отверстия располагались равномерно на поверхности фильтра, то интенсивности притока в начальном $z = 0,01$ и среднем сечениях фильтра $z = 0,5$ отличались бы от интенсивности притока в конечном сечении фильтра соответственно в 4,7 и 2,8 раза.

Помимо приведенных выше опытов были использованы данные экспериментов М.А. Воынова [10] на пластмассовых перфорированных гофрированных трубах, помещенных в лоток прямоугольного сечения. Гофры наносились для увеличения коэффициента трения применяемых труб. Всего было проведено 10 серий экспериментов. В каждой серии измерялось давление вдоль трубы и расход через выходное сечение при десяти глубинах погружения оси трубы.

Внутренний диаметр трубы $D = 45,4$ мм. Гофры синусоидального

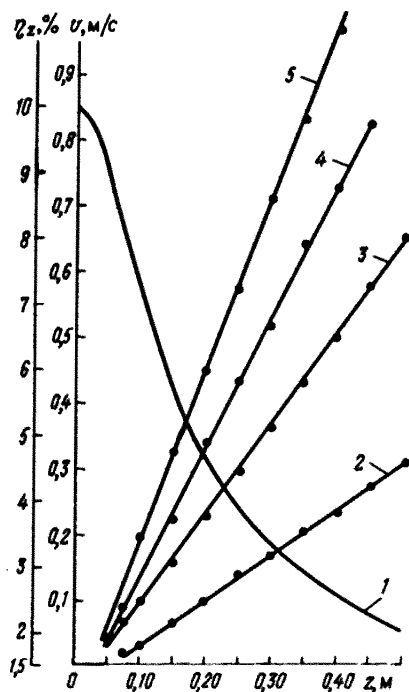
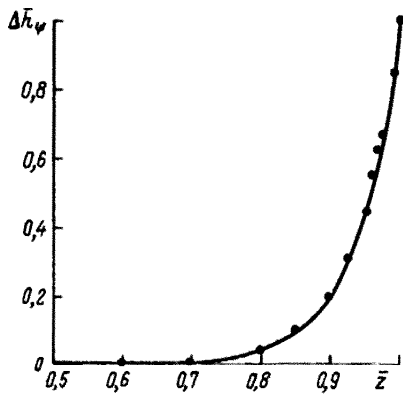


Рис. V. 7. Графики распределения скважности (1) и осевой скорости (2, 3, 4, 5) по длине фильтра:

2 — $Q \approx 0,5$ л/с; 3 — $Q \approx 1,0$ л/с; 4 — $Q \approx 1,5$ л/с; 5 — $Q \approx 2,0$ л/с

Рис. V. 8. График распределения относительных потерь напора $\Delta \bar{h}_\psi$ по длине фильтра при $\alpha = 8,0$, $L = 10$ м, $\eta = 0,007$ (опыт М.А. Воынова)



сечения нанесены по винтовой линии, шаг гофра 6 мм, высота 3 мм. Диаметр отверстий $d_o = 1,4$ мм. Сквозность труб составляла 0,18 – 1,75 %, длина труб $L = 4 \div 20$ м, расход на выходе трубы $Q = 1,19 \div 6,07$ л/с.

По данным эксперимента автором были рассчитаны величины относительных потерь напора $\Delta \bar{h}_{\psi(z)}$ и нанесены на график теоретической зависимости $\Delta \bar{h}_{\psi(z)} = f(\bar{z})$. Наложение опытных значений $\Delta \bar{h}_{\psi(z)}$ на теоретическую кривую (рис. V. 8) подтвердило справедливость зависимостей (III. 15), (III. 20), (III. 55) и при существенных потерях напора на трение внутри перфорированной трубы. В опытах потери напора на трение составляли 33 – 61 % от общих потерь. По данным М.А. Воынова, коэффициент гидравлического трения в пределах активного (работающего) участка труб $\lambda_o \approx 0,07 \div 0,16$. По расчетам автора, $\lambda_o = 0,07 \div 0,18$, при этом вычисления производились согласно зависимости

$$\lambda_o(z) = - \frac{2D \left[g \frac{dz}{dz} + \frac{8\psi}{D} \sqrt{2g \Delta h_{\psi(z)}} (v_L - \frac{4\psi}{D} \int_z^L \sqrt{2g \Delta h_{\psi(z)}} dz) \right]}{\left[v_L - \frac{4\psi}{D} \int_z^L \sqrt{2g \Delta h_{\psi(z)}} dz \right]^2} \quad (V. 7)$$

§ 2. ГИДРАВЛИКА ФИЛЬТРА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С ПОРОДОЙ

Эксперименты (69 опытов) осуществлялись на сетчатых фильтрах с наружным диаметром каркаса 89 мм, толщиной стенки 4 мм и длиной водоприемной части 435 мм (рис. V. 9). Каркас фильтров представлял собой стальную трубу с проходными отверстиями диаметром 5 мм, расположенными в шахматном порядке. Сквозность каркаса составляла 18,34 и 1,79 %. Вдоль образующей линии трубчатого каркаса приваривались отрезки стальной 3-мм проволоки, на которую напайвалась латунная сетка квадратного плетения сквозностью 31,2 %.

Для удержания породы вокруг фильтра к каркасу был приварен кожух. Наружным диаметром 560 мм и высотой 500 мм. Для замера снижения напора в породе устанавливали 5 донных пьезометров на расстояниях 16; 30; 94; 162 и 225 мм от наружной стенки фильтра. Кроме того, был установлен один пьезометр, регистрирующий напор у наружной стенки фильтра в его верхней части. Пьезометрические трубки фильтра находились на расстояниях $z = 8,3; 18,0; 27,3; 37,3$ и 43,0 см от нижней части фильтра.

В качестве контактирующего материала использовали предварительно отсеянные фракции рыхлых пород диаметром d (в мм): 10 – 20; 5 – 7; 3 – 5; 1 – 3; 0,6 – 1 и $d \leq 0,6$. Гранулометрический состав породы при $d \leq 0,6$ мм характеризовался следующими показателями:

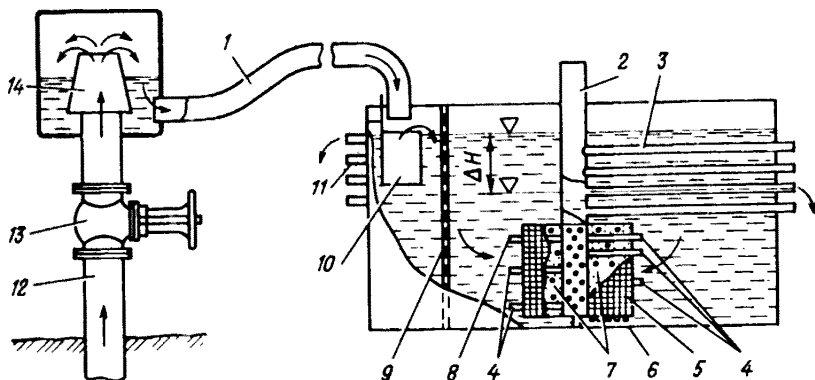


Рис. V. 9. Схема экспериментальной установки для определения гидравлических характеристик фильтра при контакте с породой:

1 — подводный трубопровод; 2 — фильтр; 3 — трубки для стова воды из фильтра; 4 — пьезометры для замера давления воды внутри фильтра; 5 — сетчатый кожух; 6 — донные пьезометры; 7 — порода; 8 — контрольный пьезометр, 9 — гаситель (перфорированный лист), 10 — бачок-аэратор; 11 — сливные патрубки; 12 — скважина; 13 — задвижка; 14 — аэратор; стрелками обозначены линии тока воды

Диаметр частиц породы, мм . . .	0,50 — 0,25	0,25 — 0,10	0,10 — 0,05	< 0,05
Содержание фракций пород, % . .	52,0	38,0	4,2	0,4

Данные измерений дебита и напоров вдоль приемной части фильтра приведены в работе [15], а зависимости разности уровней снаружи и внутри фильтра в конечном его сечении от дебита скважины представлены на рис. V. 10.

Из рассмотрения кривых $\Delta h_{\psi(L)} = f(Q)$ следует, что тип приемной поверхности фильтра (перфорированная труба, сетчатый фильтр), ее скважность, вид контактирующей с фильтром среды (вода, порода) существенно влияют на разность уровней снаружи и внутри фильтра. Согласно приведенным графикам при контакте с породой гидравлические свойства водоприемной поверхности нельзя характеризовать только ее скважностью или коэффициентом расхода отверстий и крупностью контактирующих с фильтром частиц. Так, в фильтре скважностью 18,34 % разность уровней может быть больше, чем в фильтре скважностью 1,79 % (рис. V. 10, б, в, кривые 4 и 9). Не соблюдается закономерность зависимости $\Delta h_{\psi(L)} = f(Q)$ от крупности фракций контактирующих пород при большой скважности опорного каркаса (рис. V. 10, б, кривые 4 — 8). Подобная неоднозначность объясняется обилием факторов, влияющих на условия истечения воды через приемную поверхность фильтра и, в частности, на коэффициент расхода отверстий μ .

Как показали ранее выполненные [1] и приведенные в предыдущем

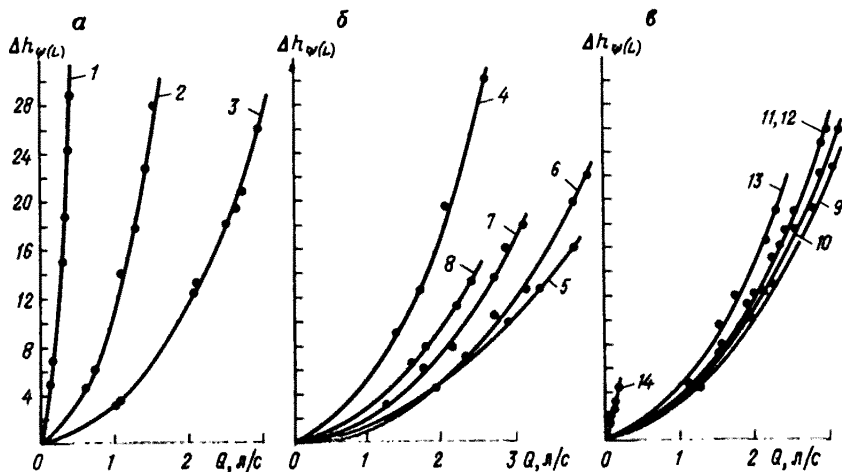


Рис. V. 10. Зависимость разности уровней снаружи и внутри фильтра в конечном сечении от дебита скважины:

а — вода; б, в — породы соответственно при $\eta = 18,34$ и $1,79$ %; 1 — $\eta = 0,23$ %; 2 — $\eta = 0,83$ %; 3 — $\eta = 1,65$ %; 4, 9 — $10 \leq d \leq 20$ мм; 5, 10 — $5 \leq d \leq 7$ мм; 6, 11 — $3 \leq d \leq 5$ мм; 7, 12 — $1 \leq d \leq 3$ мм; 8, 13 — $0,6 \leq d \leq 1$ мм; 14 — $d \leq 0,6$ мм

и настоящем параграфах исследования, основными факторами можно считать следующие: тип поровой структуры породы, контактирующей с фильтром (непосредственное наложение частиц породы на отверстия, образование свода грунта у отверстий или суффозионных воронок); наличие местных гидравлических сопротивлений у отверстий (сетка, фасонные выступы и т.п.); форма и диаметр отверстий; толщина стенки и диаметр фильтра. В связи с трудностью определения доли влияния каждого из указанных факторов на разность уровней результирующий эффект, так же как и при контакте с водой, целесообразно охарактеризовать комплексным параметром в виде обобщенного коэффициента истечения жидкости ψ , который следует устанавливать в процессе опытно-фильтрационных работ. Тем более, что эффект наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра в природных условиях проявляется различным образом в зависимости от технологии вскрытия пласта, продолжительности контакта промывочной жидкости с породой, способа установки фильтра, гранулометрического состава и степени цементации пород, а также от интенсивности развития колюматационных процессов в период опробования скважины и дальнейшей ее эксплуатации.

Проведенные эксперименты выявили существенную зависимость величины ψ от степени механической колюматации фильтра. Так, при опыте с тщательно отмытыми фракциями (фильтр скважностью $1,79$ %)

величина ψ для фракции диаметром 10 — 20 мм составляла 0,0128. Дальнейшее уменьшение размера фракций незначительно влияло на величину ψ :

Диаметр частиц породы						
d , мм	10 — 20	5 — 7	3 — 5	1 — 3	0,6 — 1	$\leq 0,6$
ψ	0,0128	0,0128	0,0117	0,0116	0,0106	0,0014; 0,0008

Лишь при проведении опыта со среднезернистым песком, в состав которого входит 52 % частиц, соизмеримых с площадью отверстия сетки, значение ψ уменьшилось до 0,0008. Последнее вызывалось заклиниванием частиц породы в отверстиях фильтровой сетки по всей ее поверхности. Это дает основание предполагать, что резкое уменьшение пропускной способности сетчатых фильтров в период пробной откачки происходит в результате почти сплошной забивки ячеек сетки частицами породы или глинизации поверхности сетки. Наличие же чистой сетки на фильтре незначительно увеличивает сопротивление движению воды в фильтр (см. рис. V. 10, а, б, кривые 3 и 5).

Для количественной оценки достоверности аналитических решений, приведенных в § 5 гл. III, по формулам (III. 39) и (III. 44) вычислялись разности уровней в пяти сечениях фильтра, а затем сравнивались с соответствующими фактическими разностями, замеренными во время опытов. Значения ψ определялись по зависимости

$$\psi = \frac{D}{4\sqrt{2}L} \operatorname{arcth} \frac{w\sqrt{g\Delta h}\psi(L)}{a}, \quad (\text{V. 8})$$

исходя из фактической разности между уровнями снаружи и внутри фильтра в конечном сечении. Распределение отклонений расчетных величин $\Delta h\psi(z)$ от фактических приведено ниже.

Интервалы отклонения расчетных величин $\Delta h\psi(z)$ от фактических, %	0 — 2,5	2,5 — 5,0	5,0 — 7,5	7,5 — 10	10
Число наблюдений m	118	98	43	14	47
Частота m/n	0,369	0,306	0,134	0,044	0,147

При этом общее число наблюдений $n = 320$. Из этих данных видно, что и при контакте с породой зависимости (III. 39) и (III. 44) достаточно достоверно описывают приток воды в фильтр-модель, и, следовательно, можно сделать косвенное заключение о распределении притока вдоль длины фильтра-модели по закону гиперсинусов. Значительные отклонения фактических величин от расчетных отмечены (в %) при диаметре фракций $10 \div 20$ мм и дебитах $Q = 3,9 \div 6,1$ л/с (12 наблюдений при общем их числе 320). Таким образом, изменение гидравлических сопротивлений водопримной поверхности фильтра (сетка на каркасе, различная скважность)

и эффект наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра (контакт с породой) не сказываются на общей структуре формулы (III. 39), и влияние указанных факторов отражается лишь в величине ψ .

Для установления закона распределения осевой скорости по длине фильтра и подтверждения справедливости ранее полученных зависимостей и принятых допущений проводились опыты на гидравлической установке (рис. V. 11).

Основные узлы гидравлической установки — напорный бак 6, сетчатый цилиндрический кожух 13, фильтр 12 и система для подачи и отвода воды из фильтра.

Фильтр длиной рабочей части 1,5 м представлял собой перфорированную стальную трубу с внутренним диаметром 48 мм, толщиной стенки 1,2 мм, диаметром отверстий 3 мм, числом отверстий равномерной разбивки $n = 1200$ и скважностью 3,75 %. На перфорированную трубу навивалась проволока и припаивалась медная сетка квадратного плетения. Давление внутри фильтра замерялось 19 пьезометрами, а в породе 45 точечными пьезометрами, по пять в каждом сечении. Скорость движения жидкости внутри фильтра регистрировалась с помощью микровертушки X-6.

Контактирующий с фильтром материал был представлен тщательно отсеянным и неоднократно промытым гравием. Для определения гранулометрического состава было отобрано шесть проб. Результаты гранулометрического анализа показали незначительное различие в составе проб. Коэффициент неоднородности составлял 1,58 — 1,67. Среднеарифметическое содержание фракций указано ниже.

Диаметр частиц d , мм . . .	1,0	1,0 — 1,5	1,5 — 4,0	4,0 — 6,0	6,0 — 8,0	> 8,0
Содержание фракций, % . . .	0,7	0,3	4,3	35,5	43,0	16,2

Всего было проведено семь опытов, во время которых измерялись величины осевых скоростей, напоров внутри фильтра и в породе.

Проведенные эксперименты позволили непосредственно проверить справедливость принятого при выводе дифференциального уравнения притока допущения постоянства коэффициента истечения жидкости ψ по длине фильтра и теоретического предположения о распределении притока вдоль длины фильтра-модели по закону гипертангенсов.

Значения ψ по длине фильтра рассчитывались на основании формулы (II. 13). В качестве исходной принималась зависимость

$$\psi_z = \frac{D}{4\sqrt{2g \Delta h} \psi(z)} v'_z, \quad (V. 3)$$

где v'_z — первая производная скорости потока внутри фильтра по координате z .

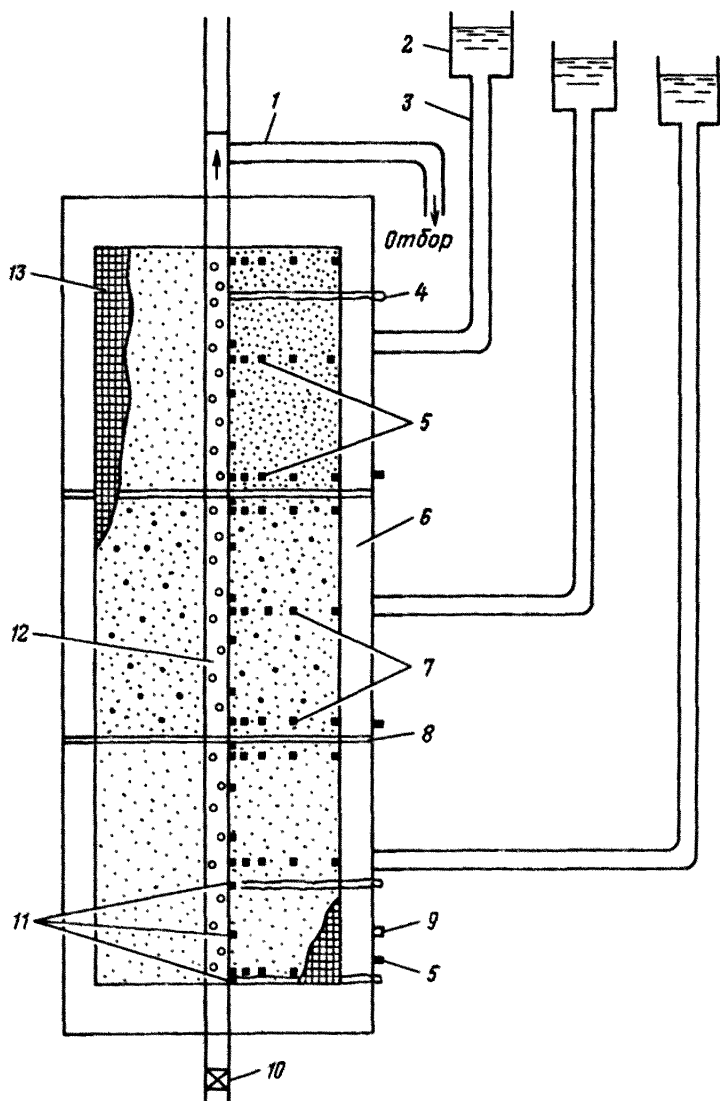


Рис. V. 11. Схема гидравлической установки:

1 — отводящий трубопровод; 2 — питающий бачок; 3, 4 — соответственно гибкий и промежуточный шланги; 5 — пьезометры баков; 6 — напорный бак; 7 — пьезометры в породе; 8 — резиновая прокладка; 9 — штуцер; 10 — заглушка; 11 — отводы к пьезометрам фильтра; 12 — фильтр; 13 — сетчатый кожух

Для определения v_z' строился график $v_z = f(z)$. С полученного графика через 0,1 м снималось значение v_z , а затем рассчитывалась производная

$$v_z' = \frac{v_{2z} - v_{0z}}{2l},$$

где v_{2z} и v_{0z} — значения скорости, снятые с графика $v_z = f(z)$ и равноотстоящие от v_{1z} ; l — длина интервала.

Значения разности $\Delta h_{\psi(z)}$ находились исходя из построенных зависимостей напоров внутри фильтра $H_{вz}$ и у его наружной стенки $H_{нz}$ от ординаты z . Ввиду малой разности между напорами внутри и снаружи фильтра в его забойной части в табл. V. 1 помещены результаты подсчета ψ_z , начиная с $\Delta h_{\psi(z)} > 2$ мм.

Как следует из табл. V. 1, при сборе воды коэффициент истечения жидкости ψ , а следовательно, и коэффициент расхода отверстий μ (вследствие равномерной разбивки отверстий) может быть принят постоянным вдоль длины фильтра. Таким образом, условие $\psi = \text{const}$, допущенное при выводе приведенного дифференциального уравнения притока (II. 54), справедливо.

Для установления закона распределения скорости потока вдоль длины фильтра по опытным данным находились значения относительной скорости и относительной ординаты.

Согласно рис. V. 12 (кривая — теоретическая, точки — значения эксперимента) распределение притока к фильтру-модели подчиняется закону гиперсинусов, и, следовательно, использование этого закона распределения для получения параметра притока α , определения соответствующих гидравлических характеристик потока и зависимостей между ними (§ 3 и 5 гл. III) достаточно обосновано. Наложение построенного графика

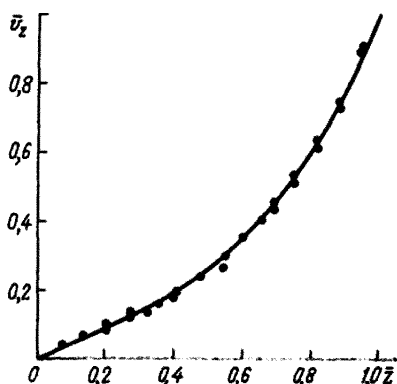


Рис. V. 12. График распределения относительной скорости по длине фильтра при $\alpha = 2,48$

z, м	Q, л/с								
	0,80			1,23			1,24		
	v_z', c^{-1}	$\Delta h_m \psi$	$\psi \cdot 10^2$	v_z', c^{-1}	$\Delta h_m \psi$	$\psi \cdot 10^{-2}$	v_z', c^{-1}	$\Delta h_m \psi$	$\psi \cdot 10^2$
0,85	0,260	0,0017	1,71	0,395	0,0040	1,89	0,405	0,0078	1,24
0,95	0,300	0,0027	1,56	0,445	0,0061	1,54	0,470	0,0098	1,29
1,05	0,347	0,0039	1,50	0,515	0,0092	1,46	0,545	0,0116	1,37
1,15	0,405	0,0056	1,47	0,600	0,0130	1,42	0,640	0,0158	1,38
1,25	0,475	0,0079	1,45	0,710	0,0183	1,42	0,750	0,0211	1,40
1,35	0,570	0,0105	1,51	0,860	0,0245	1,49	0,875	0,0289	1,39
1,45	0,675	0,0132	1,59	1,050	0,0329	1,57	1,150	0,0395	1,57

Продолжение табл. V. 1

z, м	Q, л/с								
	1,49			2,01			2,04		
	v_z', c^{-1}	$\Delta h_m \psi$	$\psi \cdot 10^2$	v_z', c^{-1}	$\Delta h_m \psi$	$\psi \cdot 10^2$	v_z', c^{-1}	$\Delta h_m \psi$	$\psi \cdot 10^2$
0,85	0,495	0,0097	1,36	0,655	0,0160	1,40	0,705	0,0125	1,71
0,95	0,595	0,0120	1,47	0,790	0,0212	1,47	0,835	0,0167	1,75
1,05	0,695	0,0150	1,54	0,950	0,0279	1,54	0,975	0,0233	1,73
1,15	0,810	0,0215	1,50	1,115	0,0380	1,55	1,1025	0,0337	1,63
1,25	0,925	0,0286	1,48	1,290	0,0501	1,56	1,290	0,0477	1,60
1,35	1,055	0,0390	1,45	1,490	0,0697	1,53	1,465	0,0697	1,50
1,45	1,190	0,0528	1,40	1,705	0,0979	1,48	1,655	0,0978	1,43

$\bar{v}_z = f(\bar{z})$ на палетку $\bar{v} = sha\bar{z}/sha$ (рис. 3 приложения) позволило найти параметр распределения притока a . Данные опытов позволили также апробировать зависимость (III. 54) и, в частности, равенство безразмерного разностного напора (понижения уровня) квадрату относительной скорости ($\bar{H}_z = \bar{v}_z^2$).

Сравнение величин разностного напора и квадрата относительной скорости (табл. V. 2) свидетельствует о справедливости равенства $\bar{H}_z = \bar{v}_z^2$ и, как следствие этого, достоверности предложенной зависимости (III. 59) для определения коэффициента трения в перфорированных трубах.

Кроме того, рассматривалась возможность расчета скоростей потока внутри фильтра по зависимости (III. 15). Параметр распределения притока a определялся исходя из соотношения (III. 19). При этом значения ψ

z, м	Q, л/с								
	2,08 л/с			2,04			1,49		
	$H_z, м$	\bar{H}_z	\bar{v}_z^2	$H_z, м$	\bar{H}_z	\bar{v}_z^2	$H_z, м$	\bar{H}_z	\bar{v}_z^2
0,017	2,308	0,000	—	2,308	0,000	—	2,354	0,000	—
0,986	2,281	0,181	0,171	2,282	0,190	0,175	2,339	0,203	0,166
1,036	2,275	0,221	0,187	2,282	0,190	0,198	2,338	0,216	0,197
1,122	2,264	0,295	0,261	2,272	0,263	0,278	2,332	0,297	0,282
1,220	2,256	0,349	0,381	2,257	0,372	0,393	2,324	0,405	0,397
1,320	2,224	0,564	0,521	2,232	0,555	0,555	2,310	0,594	0,549
1,420	2,195	0,758	0,808	2,205	0,752	0,810	2,297	0,770	0,788
1,505	2,159	1,000	1,000	2,171	1,000	1,000	2,280	1,000	1,000

Продолжение табл. V. 2

z, м	Q, л/с								
	1,24			1,23			2,01		
	$H_z, м$	\bar{H}_z	\bar{v}_z^2	$H_z, м$	\bar{H}_z	\bar{v}_z^2	$H_z, м$	\bar{H}_z	\bar{v}_z^2
0,017	2,370	0,000	—	2,374	0,000	—	2,314	0,000	0,001
0,986	2,358	0,207	0,187	2,362	0,222	0,200	2,287	0,198	0,181
1,036	2,356	0,241	0,214	2,358	0,296	0,228	0,282	0,235	0,206
1,122	2,352	0,310	0,272	2,355	0,352	0,288	2,272	0,309	0,279
1,220	2,346	0,414	0,412	2,351	0,426	0,393	2,258	0,412	0,397
1,320	2,336	0,586	0,579	2,342	0,592	0,513	2,236	0,574	0,549
1,420	2,326	0,759	0,803	2,332	0,778	0,774	2,210	0,765	0,806
1,505	2,312	1,000	1,000	2,320	1,000	1,000	2,178	1,000	1,000

по каждому опыту принимались как среднее арифметическое рассчитанных величин (см. табл. V. 1). Параметр F находился из выражения (III. 58) в соответствии с данными опыта. Сравнение расчетных (v_p) и фактических (v_ϕ) значений v_z (табл. V. 3) позволяет сделать вывод о возможности прогноза распределения притока по длине приемной части скважины при любом заданном дебите, если заранее известны вероятные значения коэффициента истечения жидкости ψ и параметра внутреннего сопротивления приемной части скважины F .

Расчетные и фактические значения скорости потока
внутри фильтра в различных сечениях, см/с

z, м	Q, л/с									
	2,04		1,49		1,24		1,23		2,01	
	v _ф	v _р	v _ф	v _р	v _ф	v _р	v _ф	v _р	v _ф	v _р
0,102	4,5	2,7	3	2,4	3,0	2,0	—	—	5	2,9
0,199	7,7	5,4	6	4,8	5,5	4,0	6	3,6	8	5,8
0,300	9,5	8,3	7	7,4	7,0	6,2	7	5,6	11	9,0
0,400	13,0	11,5	10	10,2	9,0	8,5	9	7,6	14	12,4
0,487	15,0	14,6	12	12,9	10,0	10,7	11	9,7	16	15,6
0,526	17,7	16,1	13	14,1	11,7	11,7	11	10,6	18	17,2
0,612	21,0	19,7	15	17,1	14,0	14,2	14	12,9	21	20,9
0,712	26,0	24,5	19	21,0	17,0	17,4	17	16,0	26	25,8
0,811	31,1	30,0	23	25,3	20,0	21,0	21	19,4	32	31,4
0,900	39,0	35,8	28	29,7	25,0	24,6	24	23,0	37	37,2
0,986	46,0	42,3	33	34,6	29,0	28,6	30	27,0	46	43,6
1,036	49,0	46,6	36	37,6	31,0	31,2	32	29,6	49	47,8
1,122	58,0	54,8	43	43,6	35,0	36,1	36	34,5	57	55,8
1,220	69,0	65,7	51	51,3	43,0	42,5	42	41,1	68	66,3
1,320	82,0	79,1	60	60,5	51,0	50,0	48	49,0	80	79,0
1,420	99,0	95,0	72	71,2	60,0	58,9	59	58,3	97	94,0
1,500	110,0	110,0	81	81,0	67,0	67,0	67	67,0	108	108,0

§ 3. ГИДРАВЛИКА ФИЛЬТРА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Экспериментальные исследования проводились на специально созданном опытном полигоне в г. Каменка-Днепровская.

По данным бурения, напорный водоносный пласт мощностью $m = 20$ м на участке работ представлен несцементированными разнозернистыми песками. Схема вскрытия пласта представлена на рис. V. 13. В связи с необходимостью замера давления внутри фильтра в нескольких его сечениях была пробурена двухствольная скважина конструкции В.П. Ткаченко. Приемная часть скважины оборудовалась фильтром в виде перфорированной трубы с проволоочной обмоткой. Наружный диаметр фильтра 150 мм, диаметр отверстий $d_0 = 5$ мм, скважность перфорированной трубы $\eta \approx 10\%$. Вокруг фильтра была создана однослойная гравийная обсыпка диаметром 800 мм, межслойный коэффициент $D_{50}/d_{50} = 9$. Напоры внутри гравийной обсыпки фиксировались точечными пьезометрами диаметром около 30 мм и длиной 5 см. Потери напора в пласте определялись по четырем наблюдательным скважинам диаметром 89 мм, длиной фильтра 0,5 и 1 м. Откачка производилась погружным насосом ЭЦВ-12

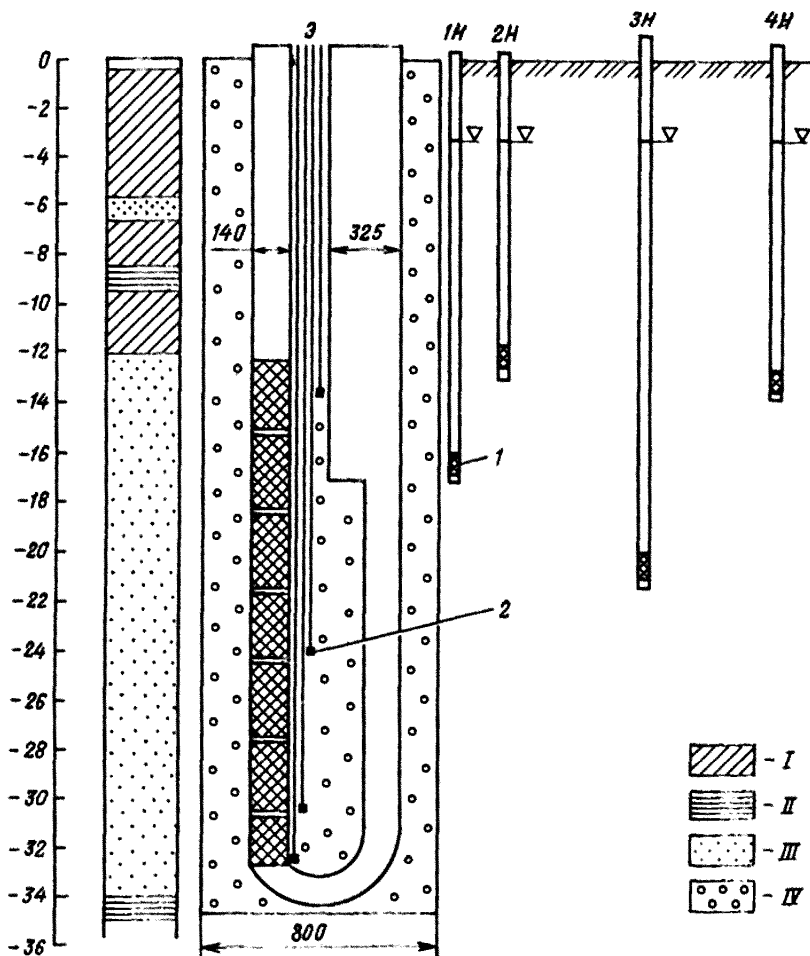


Рис. V. 13. Схема вскрытия пласта на полигоне "Каменка":

1 — пьезометры в гравийной обсыпке; 2 — пьезометры в пласте; 1 — суглинок; II — глина; III — песок разнoзернистый; IV — песок крупнозернистый с гравием и галькой; 3, H — соответственно экспериментальная и наблюдательная скважины

из эксплуатационной колонны скважины диаметром 325 мм. Напор внутри фильтровой части экспериментальной скважины измерялся с помощью газовых и бурильных труб диаметрами 25 и 48 мм с заваренными нижними концами и просверленными сбоку тремя отверстиями, расположенными по одной горизонтали. Колонна труб опускалась внутрь фильтра на заданную отметку. Уровень воды внутри труб измерялся хлопущкой и

электроуровнемером. Для точной фиксации установки боковых отверстий нижней трубы на заданной отметке опускаемая колонна перед экспериментом маркировалась. Давление замерялось по схеме снизу — вверх. Для обеспечения герметичности собранной колонны концы труб обматывались паклей, покрывались суриком, а затем навинчивались соединительные муфты.

Всего из экспериментальной скважины Э произведено четыре откачки с целью определения коэффициента фильтрации пород и давления внутри приемной части. Две откачки проводились в ноябре 1979 г., после чего скважина была законсервирована и до октября 1980 г. не эксплуатировалась. Данные откачек помещены в табл. V. 4. В качестве расчетного понижения уровня воды скважины принималось средне-интегральное понижение в фильтровой части.

Таблица V. 4

Дата откачки	Дебит скважины Q , л/с	Понижение уровня S в скважинах, м					Расстояние от опытной скважины r , м				
		Э	1Н	2Н	3Н	4Н	Э	1Н	2Н	3Н	4Н
2.11.1979	38,0	5,74	—	—	3,66	1,68	0,075	0,89	1,19	4,09	46,2
	11,0	1,74	—	—	1,19	0,65	0,075	0,89	1,19	4,09	46,2
28.10.1980	43,3	6,96	5,13	4,94	4,39	2,24	0,075	0,89	1,19	4,09	46,2

Таблица V. 5

Дебит скважины Q , л/с

38,0 (2.11.1979 г.)			40,4 (29.10.1980 г.)					
Номер замера	Расстояние от нулевой отметки фильтра z , м	Понижение уровня S , м	Номер замера	Расстояние от нулевой отметки фильтра z , м	Понижение уровня S , м	Номер замера	Расстояние от нулевой отметки фильтра z , м	Понижение уровня S , м
1	20,0	7,52	1	20,2	9,55	10	11,6	6,81
2	18,91	7,01	2	19,6	9,19	11	10,6	6,70
3	17,87	6,62	3	18,6	8,50	12	8,6	6,48
4	16,82	6,53	4	17,6	8,20	13	6,6	6,22
5	13,81	5,93	5	16,6	7,88	14	4,6	6,17
6	13,81	5,96	6	15,6	7,63	15	2,6	6,14
7	6,16	5,27	7	14,6	7,38	16	0,6	6,15
8	6,16	5,27	8	13,6	7,10	17	0	6,13
9	-4,78	5,12	9	12,6	6,93	18	-3,4	6,13

Понижения уровня воды по пьезометрам гравийной обсыпки, м

Дата откачки	Дебит скважины Q , л/с	Глубина установки пьезометров, м			
		19,8	17,2	11,0	0,8
2.11. 1979 г.	38,0	6,77	—	5,63	5,26
29.10. 1980 г.	40,4	9,18	8,0	6,38	5,64

Коэффициент фильтрации пласта рассчитывался способом площадного прослеживания исходя из зависимости

$$S = A + B \ln r,$$

где A — постоянная; $B = Q / (2\pi km)$ — угловой коэффициент прямой $S = f(\ln r)$.

Среднее значение коэффициента фильтрации пласта в пределах зоны $0,075 \leq r \leq 46,2$ м оказалось равным по трем откачкам $k_{\text{ср}} = 42,5$ м/сут.

Значения понижения уровня воды внутри фильтра, полученные путем замера уровня в штанге-пьезометре, представлены в табл. V. 5. За нулевую отметку фильтра принималось сечение, примыкающее к кровле водоносного пласта. Величины понижений уровня воды по пьезометрам, установленным в гравийной обсыпке, приведены в табл. V. 6.

Согласно приведенным данным при интенсивном отборе воды из скважины существенное значение приобретают потери напора, обусловленные движением потока внутри ее приемной части. В результате этого понижение уровня воды в скважине является переменной величиной. Наименьшее понижение уровня отмечается у входного (нулевого) сечения фильтра, наибольшее — у выходного. В эксперименте измеренная разность напоров (понижений) между входным и выходным сечениями составляла $\Delta h_L = 2,4 \div 3,4$ м. Такая же разность напоров зафиксирована пьезометрами, расположенными в гравийной обсыпке.

Для установления закона распределения притока по длине фильтра на основании данных табл. V. 5 построены графики $S_z = f(z)$ при $Q = 38,0$ и $40,4$ л/с (рис. V. 14), а затем рассчитаны относительные понижения по выражению (III. 53). Наложение зависимостей $\bar{S}_z = f(\bar{z})$ при $Q = 38,0$ и $40,4$ л/с (рис. V. 15) на палетки $\bar{S} = \text{tg}^2 \gamma \bar{z} / \text{tg}^2 \gamma$ и $\bar{S} = \text{sh}^2 \alpha \bar{z} / \text{sh} \alpha$ (рис. 4 и 5 приложения) свидетельствует о том, что распределение напора, а следовательно, и притока по длине фильтра при дебитах 38,0 и 40,4 л/с соответствует как закону тангенсов, так и закону синусов. Параметры распределения притока γ и α представлены ниже.

Дебит скважины Q , л/с	38,0	40,4
Параметры притока:		
γ	0,86	0,90
α	1,48	1,58

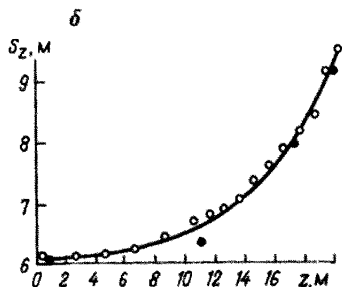
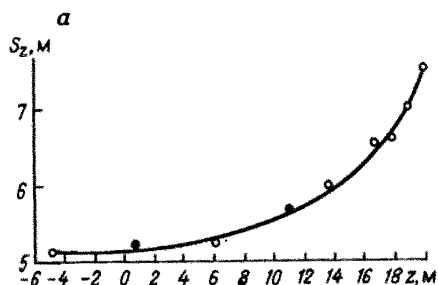


Рис. V. 14. График изменения понижения уровня воды (давления) внутри фильтра и в гравийной обсыпке (сква. Э, полигон "Каменка") :

а — $Q = 38,0$ л/с (откачка 2.11.1979 г.); б — $Q = 40,4$ л/с (откачка 29.10.1980 г.); светлые и черные кружки — соответственно замеры в скважине и пьезометрах гравийной обсыпки

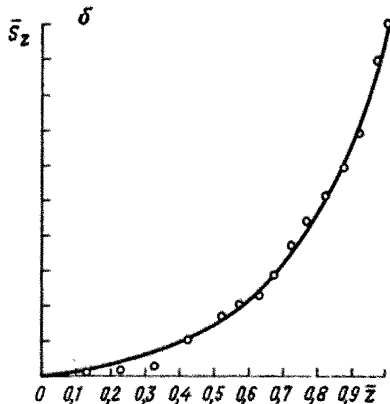
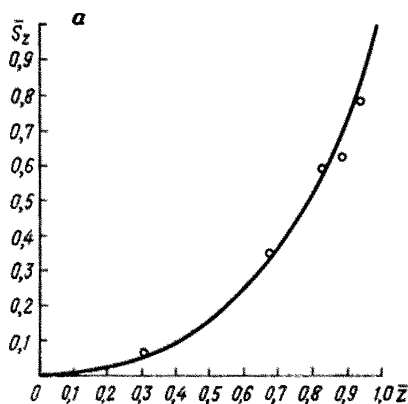


Рис. V. 15. Зависимость относительного понижения уровня воды от длины фильтра (сква. Э, полигон "Каменка") :

а — $Q = 38,0$ л/с; $\gamma = 0,86$; $\alpha = 1,48$ (откачка 2.11.1979 г.); б — $Q = 40,4$ л/с; $\gamma = 0,90$; $\alpha = 1,58$ (откачка 29.10.1980 г.)

Таким образом, эксперимент выполнен в диапазоне относительно малого значения коэффициента $c = (E + F^*) / (A + 2B)$, когда кривые распределения практически совпадают (см. § 2 гл. III, вычислительный эксперимент).

Полученные в § 3 гл. III результаты позволили найти расхождение между значениями относительной скорости и разностного напора при распределениях по законам тангенсов и гиперсинусов. В качестве коэффициентов расхождения приняты отношения

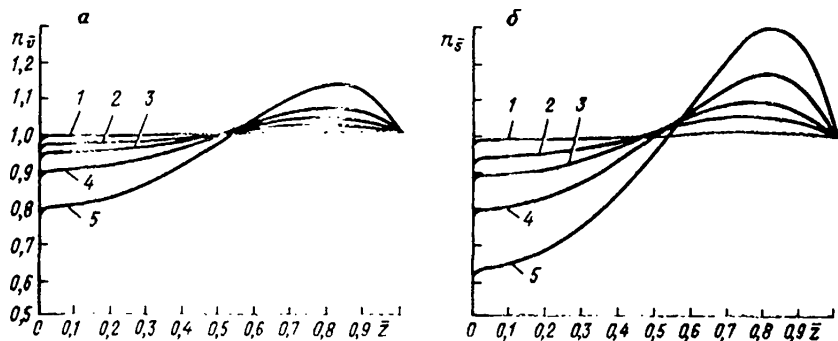


Рис. V. 16. Графики изменения коэффициентов расхождения относительной скорости (а) и относительного разностного напора (б) по длине фильтра:

1 - $\gamma = 0,6$; 2 - $\gamma = 1,0$; 3 - $\gamma = 1,1$; 4 - $\gamma = 1,2$; 5 - $\gamma = 1,3$

$$n_v = \bar{v}_\alpha / \bar{v}_\gamma \text{ и } n_s = \bar{S}_\alpha / S_\gamma,$$

где $\bar{v}_\alpha = \text{sh } \alpha \bar{z} / \text{sh } \alpha$; $\bar{v}_\gamma = \text{tg } \gamma \bar{z} / \text{tg } \gamma$; $\bar{S}_\alpha = \text{sh}^2 \alpha \bar{z} / \text{sh}^2 \alpha$ и $\bar{S}_\gamma = \text{tg}^2 \gamma \bar{z} / \text{tg}^2 \gamma$.

Из графиков (рис. V. 16) следует, что при прочих равных условиях расхождение в разностных напорах более существенно, чем в относительных скоростях. Для относительной скорости расхождения при разных законах распределения существенны при $\gamma \geq 1,1$ или $\alpha \geq 2,08$, для разностного напора - при $\gamma \geq 1,0$ или $\alpha \geq 1,76$. Наибольшее расхождение отмечается в начальном сечении и сечении $\bar{z} \approx 0,8$, в средней части фильтра значения относительной скорости и разностного напора совпадают.

Полученные экспериментальные данные позволили определить параметр внутреннего сопротивления приемной части F и коэффициент турбулентного трения λ .

Параметр F определялся по зависимости (III. 58), при этом внутренний диаметр принимался равным $D_v = 0,14$ м, $L = 20,2$ м. При $Q_1 = 38,0$ л/с и $Q_2 = 40,4$ л/с соответственно получили $F = 46,3$ и $61,7$. Различие в величинах F экспериментальной скважины можно объяснить "старением" скважины вследствие ее годичной консервации в период между откачками.

Коэффициент турбулентного трения находился по общей зависимости (III. 59) и частному выражению (III. 61). Данные расчета при $Q = 38,0$ л/с приведены ниже.

z , м	2	4	6	8	10	12	14	16	18
λ по формуле:									
(III. 59)	0,608	0,507	0,287	0,229	0,186	0,157	0,149	0,143	0,146
(III. 61)	0,815	0,413	0,282	0,219	0,183	0,161	0,148	0,140	0,137

Для проверки непротиворечивости приведенных ранее формул факти-

ческой механике притока воды в скважину по зависимостям (III. 18), (IV. 5) и (IV. 8) были рассчитаны величины γ и S_L при пренебрежении потерями напора вследствие прохождения воды через боковую поверхность фильтра и внутри неперфорированных труб. Расчетные и экспериментальные (фактические) значения параметра притока и понижения уровня следующие:

Дебит скважины Q , л/с	38,0	40,4
Параметр γ :		
расчетный	0,84	0,93
фактический	0,85	0,90
Понижение уровня S_L , м:		
расчетное	7,79	8,96
фактическое	7,54	9,55

Сравнение расчетных и фактических величин γ и S_L показывает приемлемость зависимостей (III. 18), (I) и (IV. 8) для практики.

Выводы

1. Вид и абсолютные значения гидравлических сопротивлений, возникающих при движении жидкости через фильтр, зависят от большого числа факторов, основные из которых следующие: тип структуры породы, контактирующей с фильтром; форма приемной поверхности фильтра и его скважность; шероховатость внутренних стенок, длина и диаметр фильтра.

Ввиду того что влияние отдельных факторов проявляется не порознь, а совместно, результирующий эффект можно охарактеризовать двумя комплексными параметрами: коэффициентом истечения жидкости ψ и параметром внутреннего сопротивления приемной части F , которые однозначно определяют разность уровней между наружной и внутренней стенками приемной части скважины и потери напора внутри нее.

2. Согласно лабораторным и натурным исследованиям распределение притока вдоль длины фильтра подчиняется закону тангенсов или гиперсинусов в зависимости от граничных условий на его стенке. Натурные эксперименты показали, что при интенсивном отборе из скважины потеря напора, обусловленная движением воды внутри фильтра, может достигать значительной величины, вследствие чего понижения уровня существенно различаются по длине фильтра. Наименьшее понижение отмечается у входного нулевого сечения фильтра, наибольшее — у выходного. Таким образом, при интенсивном отборе понятие понижения уровня в скважине теряет свою однозначность.

3. Для любой заданной длины и диаметра фильтра существует оптимальная скважность, начиная с которой увеличение скважности не приводит к уменьшению потерь напора на прохождение жидкости через фильтр и с этой точки зрения такое увеличение нецелесообразно. Диапазон опти-

мальной скважности составляет 2 — 5 %. Возрастание скважности выше оптимальной необходимо для увеличения продолжительности срока службы эксплуатационных скважин, подверженных кольматации.

При необходимости можно добиться желаемого закона распределения притока, изменяя плотность расположения отверстий по длине фильтра. В частности, создание переменной скважности и сочетание участков приемной части с различной пропускной способностью позволит перераспределять в нужном направлении входные скорости жидкости и тем самым будет способствовать устранению условий, благоприятствующих выносу песчаных частиц и развитию кольматации фильтров в результате отложения химических соединений и выделения пузырьков газа в контактной зоне фильтр — порода. Для создания равномерного притока в пределах вскрытой части пласта при любой интенсивности отбора и установке насоса выше фильтра скважность в забойной части должна быть наибольшая, при этом уменьшение ее по длине обратно пропорционально ординате рассматриваемого сечения.

4. Проведенные эксперименты в фильтрационных лотках и натурных условиях подтвердили справедливость принятого допущения о постоянстве коэффициента ψ по длине фильтра (случай равномерной разбивки отверстий) и теоретического предположения о законах распределения притока вдоль длины приемной части. Данные апробации предложенных зависимостей выявили их достаточную точность для расчета потерь напора, определения параметров γ и α , понижения уровня в эксплуатационной колонне скважины и коэффициентов турбулентного трения.

5. Кроме применения при расчете потерь напора в скважинах, коэффициент ψ и параметр F целесообразно использовать также в качестве основных критериев при гидравлической оценке существующих типов фильтров и создаваемых опытных образцов. Лабораторные испытания фильтров в породах различного гранулометрического состава позволят с помощью коэффициента ψ и параметра F провести сравнительную оценку гидравлического совершенства исследуемых конструкций, определить конструкции с наибольшей водозахватной способностью и выявить приемлемость тех или иных технических усовершенствований.

Значительный интерес представляет коэффициент ψ при изучении динамики кольматационных процессов. На основании анализа величины и закона изменения коэффициента ψ можно составить вполне определенное представление о характере развития кольматационных процессов в различных природных условиях, так как это коэффициент не зависит непосредственно от размеров фильтра и гидродинамических факторов.

Использование коэффициента ψ и параметра F возможно и для оценки применяемой технологии бурения, способа установки и разглинизации фильтра, а также в комплексных исследованиях по перфорации обсадных колонн и цементного кольца скважин различными перфораторами при разном весе взрывчатого вещества.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПЛАСТ – СКВАЖИНА

§ 1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МОДЕЛИ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В связи с ограниченными возможностями набора параметров пласта при исследовании в лотках или натурных условиях была также выполнена серия опытов на электрической сеточной модели системы пласт – скважина, которая позволила существенно расширить диапазон исследований. Цель экспериментов – выявление закономерностей движения жидкости в пласте, околоскважинном пространстве и самой скважине, нахождение наилучшего подхода к аналитическому решению задачи притока, уточнение граничных условий для решения дифференциальных уравнений и апробация предложенных зависимостей. В качестве аналогового устройства использовался интегратор БУСЭ-70. Принципиальная схема модели системы пласт – скважина (ЭМПС) приведена на рис. VI. 1.

Модель представляет собой сетку постоянных и переменных активных сопротивлений. Падение напряжения на активных сопротивлениях и сила тока аналогичны соответственно потере напора на фильтрационных или гидравлических сопротивлениях и расходу жидкости. Разбивка потока по вертикали осуществляется горизонтальными плоскостями, а по горизонтали – цилиндрическими поверхностями, ось которых совпадает с осью скважины. Любой из выделяемых блоков представляется горизонтальными и вертикальными сопротивлениями. В отличие от схемы Мятлева – Гиринского, обычно применяемой при моделировании водоотбора из скважины, в каждом выделенном блоке модели учитываются горизонтальные и вертикальные составляющие скорости фильтрации независимо от абсолютного значения проницаемости пород.

Масштабные коэффициенты следующие:

$$a_R = \frac{\Phi}{R}; \quad a_U = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\Delta U}; \quad a_I = \frac{Q}{I}, \quad (\text{VI. 1})$$

где a_R , a_U и a_I – соответственно масштабы сопротивлений, потенциалов и токов; $\Phi = (H_{\max} - H_{\min})/Q$ – фильтрационное сопротивление пласта; $(H_{\max} - H_{\min})$ – разность между максимальными и минимальными значениями напора; Q – фильтрационный расход; R – активное сопротивление; ΔU – напряжение на выходных клеммах интегратора; I – сила тока.

Величины масштабных коэффициентов выбираются из условия

$$a_U / (a_I a_R) = 1. \quad (\text{VI. 2})$$

Постоянные активные сопротивления, являющиеся аналогами фильтра-

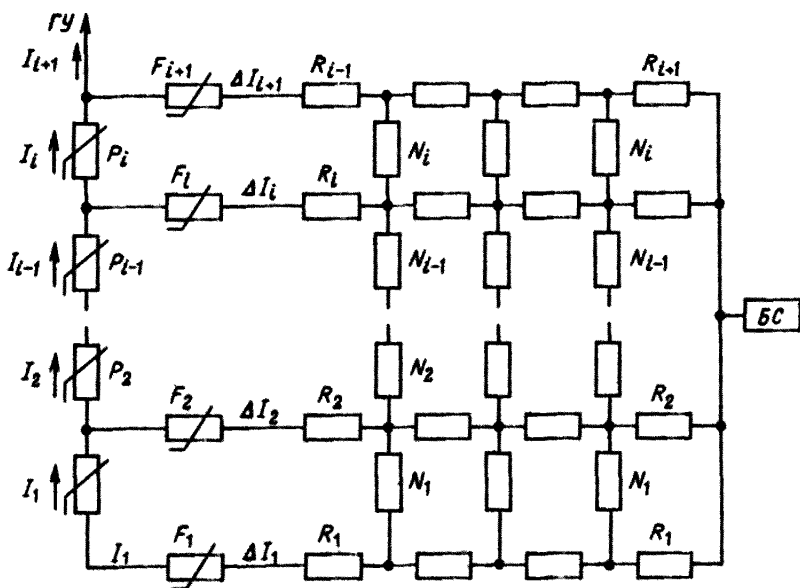


Рис. VI. 1. Принципиальная схема модели системы пласт — скважина:

R_i — аналог фильтрационных сопротивлений пласта по горизонтали; N_i — аналог фильтрационных сопротивлений пласта по вертикали; F_i — аналог гидравлических сопротивлений, возникающих при прохождении жидкости через перфорационные отверстия; P_i — аналог гидравлических сопротивлений, возникающих при прохождении жидкости внутри приемной части скважины; $1, 2, \dots, i$ — порядковый номер горизонтальных и вертикальных сечений; ΓY — граничное условие I и II рода; БС — блок со скважиной

ционных сопротивлений пород по горизонтали и вертикали, соответственно равны [11, 23, 28]

$$R_i = \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi k_i \Delta z a_R} \text{ и } N_i = \frac{\Delta z}{\pi k_i (r_{i+1}^2 - r_i^2) a_R}, \quad (\text{VI. 3})$$

где r_{i+1} и r_i — радиусы цилиндрических поверхностей, ограничивающих зону $r_i \leq r \leq r_{i+1}$ (радиусы границ блоков); k_i — коэффициент фильтрации пород в зоне $r_i \leq r \leq r_{i+1}$; Δz — высота блока (длина интервала между сечениями по горизонтали).

Согласно зависимостям (II. 14) и (VI. 1) аналог нелинейного гидравлического сопротивления, обусловленного прохождением жидкости через входные (перфорационные) отверстия, запишется в конечных приращении в виде

$$F_i = \frac{\Delta l_i}{2g (\pi D \psi \Delta z)^2} \frac{a_i}{a_R}. \quad (\text{VI. 4})$$

Представляя в соответствии с зависимостью (II. 11) общее падение пьезометрического напора внутри приемной части скважины на небольшом ее отрезке в виде суммы

$$\Delta h = \frac{Q_{i+1}^2 - Q_i^2}{gW^2} + \frac{1}{2gDW^2} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \lambda Q^2 dz$$

и заменяя приведенный интеграл площадью трапеции, будем иметь

$$\Delta h = \frac{Q_{i+1}^2 - Q_i^2 + 4B\lambda_{i+1}Q_{i+1}^2 + 4B\lambda_iQ_i^2}{gW^2},$$

где Q_{i+1} и Q_i — расходы жидкости в приемной части скважины в сечениях $(i+1)$ и i ; $B = \Delta z/16D$; W — площадь поперечного сечения приемной части скважины.

Отсюда, учитывая очевидное равенство

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta Q_i,$$

после элементарных преобразований получим выражение для аналога нелинейного гидравлического сопротивления, обусловленного преодолением сил инерции и турбулентного трения.

При любом законе изменения коэффициента турбулентного трения по длине приемной части

$$P_i = \frac{2\Delta l_{i+1}}{gW^2} \left[(1 + 4B\lambda_{i+1}) \left(1 + \frac{\Delta l_{i+1}}{2l_i} \right) + \frac{B(\lambda_{i+1} + \lambda_i)}{\Delta Q_{i+1}/2Q_i} \right] \frac{a_i}{a_R}. \quad (\text{VI. 5})$$

При изменении коэффициента турбулентного трения по закону $\lambda_i = F/\omega_i$

$$P_i = \frac{2\Delta l_{i+1}}{gW^2} \left[\left(1 + \frac{\Delta l_{i+1}}{2l_i} \right) + \frac{F}{32} \left(1 + \frac{\Delta l_{i+1}}{l_i} + \frac{\Delta l_i}{\Delta l_{i+1}} \right) \right] \frac{a_i}{a_R}, \quad (\text{VI. 6})$$

где Δl_{i+1} , Δl_i , l_i — величины токов в отдельных цепочках модели (см. рис. VI. 1).

Из выражения (VI. 5) можно получить частные случаи для P_i при практически постоянном значении λ в активном интервале фильтра и при $\lambda \rightarrow 0$.

Как следует из приведенных выше зависимостей, сопротивления R_i и N_i зависят от коэффициента фильтрации слоев и радиуса выбранных сечений, и, следовательно, их расчет не вызывает особых затруднений. Сопротивления F_i и P_i зависят от силы тока, которая является одной из неизвестных функций, и не могут быть найдены непосредственно из зависимости (VI. 5). Для обеспечения работы модели необходимо создать нелинейные аналоговые блоки F_i и P_i или рассчитать F_i и P_i методом последовательного приближения в соответствии с зависимостью (VI. 5). Вследствие сложности разработки аналоговых блоков F_i и P_i для широкого диапазона величин тока модель настраивалась методом последовательного приближения.

Вначале на модели выставлялись сопротивления R_i и N_i , подсчитанные по зависимости (VI. 3), и сопротивления F_i и P_i , заданные произвольно. После подключения сетки к пульту управления замерялась сила тока в соответствующих точках верхней цепи и по зависимости (VI. 4) находилась в первом приближении расчетная величина F_n , которая выставлялась на модель. Вновь измерялись величины токов и величина F_n во втором приближении. Аналогичным образом находилась величина P_n по (VI. 5) или (VI. 6), а затем последовательно F_{n-1} , P_{n-1} , F_{n-2} , P_{n-2} и так далее до нижнего сечения с сопротивлениями F_1 и P_1 . После этого процесс уравнивания¹ повторялся с верхнего сечения. Настройка модели считалась завершенной при достижении следующих равенств во всех сечениях сеточной модели:

$$F_n - f_1(\Delta I_n) = 0 \text{ и } P_n - f_2(\Delta I_n, I_n) = 0,$$

где F_n и P_n — расчетные величины нелинейных сопротивлений, определяемые по зависимостям (VI. 4) — (VI. 6) исходя из приближенных значений ΔI_n и I_n ; $f_1(\Delta I_n)$ и $f_2(\Delta I_n, I_n)$ — значения нелинейных сопротивлений, соответствующих фактическому соотношению токов в двух смежных цепях модели.

Далее замерялись потенциалы и величины тока и переводились в соответствующие величины напора и расхода.

Перед проведением исследований гидравлики приемной части скважины и пласта проводилась пробная серия экспериментов (16 опытов) для выявления погрешности распределений скорости и напора, полученных на модели, в зависимости от разбиения на блоки. При выборе количества сечений по горизонтали и вертикали учитывалось, что деформация реального потока наиболее выражена в зоне $r_0 \leq r \leq 0,5m$.

Разбивка модели по вертикали в первых сериях эксперимента была равномерна, а в остальных — неравномерна. Причем для скважин, фильтр

¹ Идея ручного уравнивания модели предложена сотрудником лаборатории инженерной гидрогеологии ВНИИморгео В.Е. Кузнецовым.

которых примыкал к подошве пласта, его кровле или полностью вскрывал пласт, интервал Δz уменьшался в направлении выходного сечения фильтра. Если моделируемая скважина находилась в середине пласта, то на модели наибольшая величина Δz назначалась в центре, а наименьшие выставлялись у входного и выходного сечений фильтра. Общее число блоков на модели в основных сериях экспериментов находилось в пределах $200 \div 360$. Из приведенного следует, что модель практически не имела ограничений для достаточно точного воспроизведения перетекания между слоями в пласте и отдельными пластами в неоднородной толще.

Репрезентативность электрической модели определялась путем сравнения с данными физического моделирования притока воды на гидравлической установке. Таким образом, экспериментальный материал физической модели был принят в качестве тестового для проверки представительности электрической модели. Кроме того, для сравнения было использовано аналитическое решение задачи о притоке воды в фильтр (III. 3) при незначительных потерях напора на трение, но больших скоростях внутри приемной части.

Аналитические расчеты выполнялись по формуле

$$\bar{z} = \frac{\operatorname{Arsh} c\bar{r} + D \operatorname{arccos} \frac{-b + \sqrt{1 + c^2 \bar{r}^2}}{1 - b\sqrt{1 + c^2 \bar{r}^2}}}{\operatorname{arsh} c + D \operatorname{arccos} \frac{-b + \sqrt{1 + c^2}}{1 - b\sqrt{1 + c^2}}},$$

где

$$c = \frac{\delta}{\sqrt{1 + \delta^2 \chi}}; \quad D = \frac{1}{\delta \sqrt{\chi}}; \quad b = \sqrt{1 + \delta^2 \chi}; \quad \delta = \frac{2\sqrt{2} v_L k}{9DR \psi};$$

$$\chi = \frac{gS}{v_L^2} - 1; \quad R = \ln \frac{R_K}{r_0}$$

Диапазон изменения коэффициентов фильтрации в расчетах $k = 5 \div 300$ м/сут, коэффициент истечения жидкости $\psi = 0,002 \div 0,02$. Задаваемое понижение уровня в скважине $S = 10 \div 30$ м, радиус влияния $R_K = 20 \div 3000$ м.

Как следует из табл. VI. 1, электрическая модель довольно точно имитирует распределение притока вдоль приемной части скважины.

При сопоставлении электрического и физического моделирования в качестве теста принимался опыт с $Q = 2,04$ л/с (см. табл. V. 2 и V. 3) по притоку воды в фильтр через слой гравия. Как видно из табл. VI. 2 и VI. 3, электрическая модель достаточно достоверно отображает процесс фильтрации воды через пористую среду и движение потока внутри фильтра и, следовательно, может быть использована для изучения закономер-

Таблица VI. 1

Сечения фильтра $z, \text{ м}$	Относительная ошибка результатов моделирования $\Delta v, \%$											
	Номер опыта											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	5,3	5,1	4,5	1,3	0,6	1,6	0,8	0,9	1,0	0,4	2,8	3,5
4	5,1	5,1	4,2	1,6	0,0	2,2	0,9	1,6	1,6	1,2	2,7	3,4
6	4,2	4,3	3,4	1,3	0,9	1,9	0,9	1,4	1,5	0,9	2,4	2,6
8	3,3	3,8	3,0	1,1	0,7	2,1	0,8	1,9	1,9	1,2	2,1	1,9
10	2,5	3,2	1,9	0,9	0,4	1,7	0,7	1,1	1,7	1,0	1,9	1,2
12	1,3	2,5	1,0	0,6	0,0	1,6	0,8	1,1	1,7	0,9	1,4	0,2
14	0,2	1,8	1,0	0,4	0,5	1,0	0,8	1,5	1,5	1,0	1,1	0,7
16	0,9	1,1	1,3	0,2	0,0	0,9	0,7	1,6	1,6	1,0	0,7	1,7
18	2,5	0,3	2,9	0,1	0,0	0,5	0,6	1,5	1,5	0,9	0,4	2,6
20	4,4	0,7	5,2	0,1	0,0	0,0	1,0	1,5	1,3	1,0	0,2	3,5

Таблица VI. 2

Сечения фильтра $z, \text{ м}$	$S_z, \text{ см}$	$S_{\phi}, \text{ см}$	$\Delta Q_z, \text{ л/с}$	$\Delta Q_{\phi}, \text{ л/с}$
0,1	0,63	0,60	0,055	0,054
0,2	0,66	0,65	0,057	0,054
0,3	0,71	0,70	0,060	0,072
0,4	0,80	0,80	0,064	0,072
0,5	0,92	0,85	0,071	0,072
0,6	1,08	1,00	0,073	0,072
0,7	1,30	1,35	0,086	0,090
0,8	1,65	1,80	0,102	0,109
0,9	2,12	2,50	0,122	0,127
1,0	2,82	3,20	0,146	0,145
1,1	3,80	3,70	0,171	0,172
1,2	5,24	5,20	0,205	0,199
1,3	7,25	7,35	0,242	0,235
1,4	10,12	10,2	0,290	0,271
1,5	14,0	14,0	0,330	0,289

Примечание. S_z, S_{ϕ} и $\Delta Q_z, \Delta Q_{\phi}$ — соответственно понижения уровня воды и величины бокового притока по данным электрической модели и эксперимента в фильтрационном лотке.

ностей движения жидкости к скважине, апробации полученных решений и разработки методики интерпретации расходомерии скважин с учетом влияния гидравлического сопротивления фильтра на приток воды.

Всего на модели было проведено 150 опытов. Опыты воспроизводили

Понижения уровня воды в породе по данным электрического S_z и физического S_ϕ моделирования, см

Сечение фильтра $z, \text{ м}$	$r, \text{ м}$									
	0,028		0,040		0,060		0,090		0,150	
	S_z	S_ϕ	S_z	S_ϕ	S_z	S_ϕ	S_z	S_ϕ	S_z	S_ϕ
0,8	0,48	0,40	0,41	0,30	0,32	0,25	0,24	—	0,10	0,05
0,9	0,55	0,45	0,46	0,40	0,36	0,35	0,25	0,25	0,13	0,10
1,0	0,63	0,55	0,53	0,60	0,42	0,45	0,31	0,30	0,14	0,10
1,1	0,87	0,80	0,73	0,75	0,56	0,60	0,39	0,40	0,17	0,15
1,2	1,16	1,15	0,96	1,00	0,73	0,75	0,50	0,50	0,21	0,20
1,3	1,56	1,50	1,27	1,25	0,95	0,95	0,66	0,60	0,28	0,25
1,4	1,93	1,95	1,58	1,60	1,18	1,20	0,80	0,75	0,32	0,30
1,5	2,22	2,55	1,81	2,05	1,33	1,55	0,88	1,00	0,35	0,35

работу совершенных и несовершенных скважин в однородной среде, неоднородной, трехпластовой толще с круговым контуром питания при наличии тесной гидравлической связи между пластами и в условиях их изолированности. В последнем случае задавались как одинаковые, так и разные величины напоров на контуре питания. Ввиду аналогичности форм депрессионной кривой при установившемся и квазистационарном режимах фильтрации результаты экспериментов и выявленные закономерности без большой погрешности могут быть перенесены на случай квазистационарного движения при незначительной разности коэффициентов проницаемости моделируемых пластов. Параметры пласта и скважины в экспериментах были следующими: $R_k = 3 \div 3000 \text{ м}$; $D_w = 0,15 \div 0,2 \text{ м}$; $m = 20 \div 80 \text{ м}$; $\bar{m} = 0,17 \div 1,0$; $k = 1 \div 300 \text{ м/сут}$; $\psi = 2 \cdot 10^{-4} \div \infty$; $\xi_{\bar{n}} = 0 \div 9$; $\lambda \geq 0$.

§ 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ И НАПОРОВ В ПРИЕМНОЙ ЧАСТИ СКВАЖИНЫ И ПЛАСТЕ

Сложность процессов фильтрации жидкости в неоднородном пласте и истечения в приемную часть несовершенной скважины затрудняет получение строгого гидромеханического решения задач притока. Одна из принципиальных трудностей заключается в поиске единственного решения, справедливого для всей области возмущения независимо от различия в характере и виде движения жидкости в разных зонах и внутри приемной части скважины. Постановка задачи со столь жестким условием крайне сложна, и в ряде случаев ее решение связано с непреодолимыми трудностями математического порядка.

Упрощение в постановке осесимметричной задачи притока к несовершенной скважине в неоднородной толще возможно при использовании метода фрагментирования, принципы которого изложены в § 3 гл. II. В основе метода лежит утверждение, что при справедливости закона Дарси во всей области фильтрации снижение напора (понижение уровня) в произвольной точке любой из кусочно-однородных зон можно представить в виде

$$S = S^* + \Delta S, \quad (\text{VI. 7})$$

где S^* — понижение уровня воды относительно внешней границы рассматриваемой кусочно-однородной зоны; ΔS — полное понижение уровня на той же границе, обусловленное предшествующей фильтрацией.

С целью выявления общих закономерностей притока и особенностей фильтрации в различных зонах, определения возможностей метода фрагментирования для решения уравнения притока (II. 18) и оценки справедливости принятых законов распределения скоростей по длине приемной части скважины проведена серия экспериментов с моделями совершенных и несовершенных скважин у кровли, подошвы и в центре пласта. Степень относительного вскрытия составляла в экспериментах, моделирующих однородную среду, $\bar{m} = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,00$; при моделировании трехпластовой системы $\bar{m} = 0,17; 0,33; 0,67; 0,83$ и $1,00$. Учитывая, что при экспериментальной проверке любой гипотезы желательно поставить ее в критические условия, т.е. в условия наибольшего риска, коэффициенты фильтрации пород и интенсивность отбора задавались достаточно большими. Так, коэффициенты фильтрации однородной среды принимались равными $k = 80; 300$ м/сут; в неоднородной трехпластовой толще $k = 1; 30; 100$ и 300 м/сут. Скорость потока на выходе из скважины задавалась обычно тремя ступенями: $v = 2,0; 1,0$ и $0,5$ м/с. Величина коэффициента трения принималась постоянной, произвольно-переменной по длине приемной части и в виде функции от интенсивности массопитока: $\lambda = f(\sqrt{u/v})$ и $\lambda = f(u/v)$. Кроме того, для выявления общих закономерностей притока выполнялись опыты с нулевым трением ($\lambda = 0$) и скоростями потока на выходе $v_L = 2,2 \div 16,4$ м/с (12 опытов), а также опыты по распределению притока в перфорированную трубу, помещенную в воду (два опыта).

На основании полученных аналитических решений и опытов в фильтрационных лотках было высказано предположение о возможности существования двух законов (тангенсов и гиперсинусов) распределения притока в приемной части скважины (§ 1, 2 гл. III и § 1 — 3 гл. V).

Для обоснования предложенной математической модели течения жидкости в приемной части скважины по данным эксперимента строились графики $\bar{v} = f(z)$. Всего было построено 75 кривых распределения. Эксперименты показали, что в однородной среде распределение притока вдоль приемной части во всех случаях с удовлетворительной для практи-

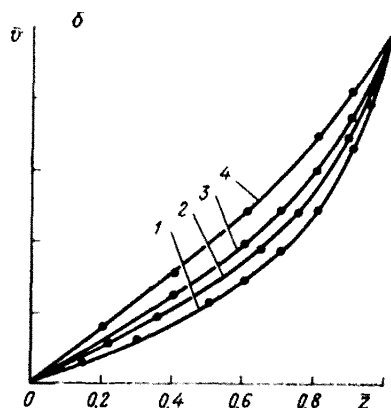
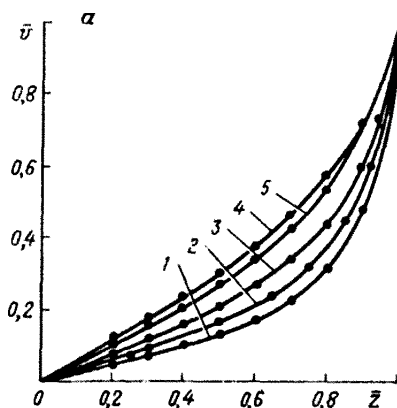
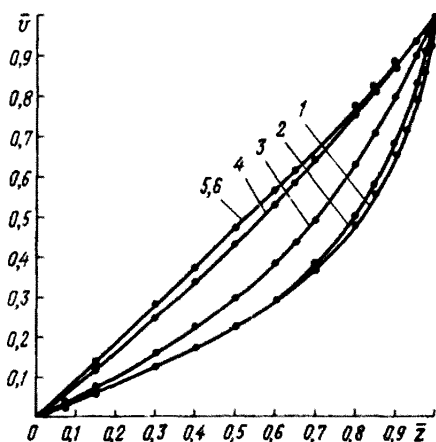


Рис. VI. 2. График распределения относительных скоростей внутри приемной части скважины в однородной среде:

$a - m = 40 \text{ м}; R_{\kappa} = 3000 \text{ м}; \lambda = 0,5;$
 $b - m = 20 \text{ м}; R_{\kappa} \leq 60 \text{ м}; \lambda = f(u/v);$
 $1, 5 - \bar{m} = 1,0; 2 - \bar{m} = 0,7; 3 - \bar{m} = 0,5; 4 - \bar{m} = 0,25$

Рис. VI. 3. График распределения относительных скоростей в различных сечениях пласта $\lambda = f(u/v), R_{\kappa} = 60 \text{ м}:$

$1 - r = 0,1 \text{ м}; 2 - r = 0,4 \text{ м}; 3 - r = 2,7 \text{ м}; 4 - r = 10 \text{ м}; 5 - r = 20 \text{ м}; 6 - r = 40 \text{ м}$



ки точностью представляются выражениями (III. 14) или (III. 15) в зависимости от условий на внешней стенке скважины (рис. VI. 2). Более того, в различных сечениях пласта распределение расхода по разрезу при интенсивном отборе также подчиняется закону тангенсов (рис. VI. 3). Следовательно, выражения (III. 14) и (III. 15) могут быть выбраны в качестве функций, аппроксимирующих распределение средней скорости потока (расхода) по длине приемной части скважины (перфорированной трубы).

В случае многослойной толщи относительная скорость по длине приемной части распределяется по тому же закону тангенсов или гиперсинусов в соответствии с выражениями (III. 9) и (III. 11), учитывающими начальную скорость в сечении $\bar{z}^* = 0$. При этом границы смены проницаемости пород характеризуются соответствующими точками перегиба (рис. VI. 4).

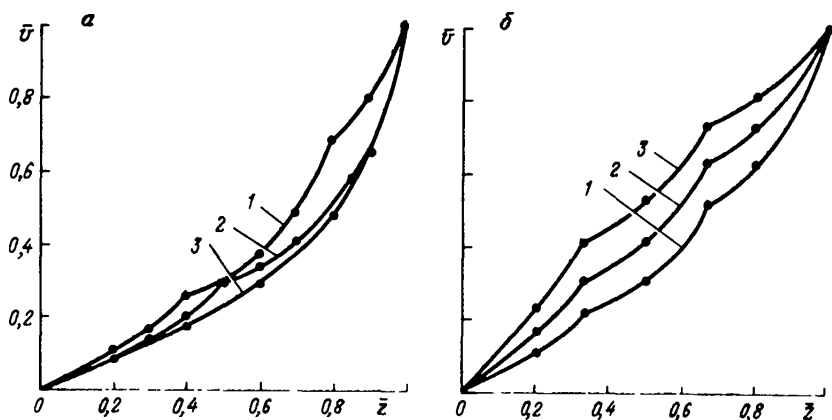


Рис. VI. 4. График распределения относительных скоростей внутри приемной части скважины в неоднородной среде при

$m = 60 \text{ м}; R_K = 3000 \text{ м}; \lambda = 0,5$:

$a: 1 - \bar{m} = 0,83; 2 - \bar{m} = 0,67; 3 - \bar{m} = 0,33; Q_1 = Q_2 = Q_3; b: 1 - Q = 63,8 \text{ н/с}; 2 - Q = 31,9 \text{ н/с}; 3 - Q = 15,8 \text{ н/с}; \bar{m} = 1,00$

Анализ полученных графиков $\bar{v} = f(\bar{z})$ также свидетельствует о сглаживании неравномерности притока в однородной среде по мере уменьшения степени вскрытия пласта при одинаковом отборе (рис. VI. 2, а, кривые 1 — 4 и рис. VI. 2, б) и по мере уменьшения отбора при одной и той же степени вскрытия пласта (рис. VI. 2, а, кривые 1, 5).

В неоднородной среде с уменьшением степени вскрытия пласта неравномерность притока может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от изменения проводимости вскрываемого интервала. Если при уменьшении степени вскрытия пласта проводимость вскрываемого интервала становится больше, то неравномерность притока может увеличиваться (рис. VI. 4, а, кривые 1 и 3). По мере уменьшения отбора при одной и той же степени вскрытия пласта неравномерность притока в неоднородной среде всегда сглаживается (рис. VI. 4, б).

Приведенные результаты указывают на существенное различие в закономерностях притока к несовершенным скважинам со значительными и близкими у нулю потерями напора на трение. В последнем случае неравномерность притока по длине приемной части увеличивается с уменьшением степени вскрытия пласта и не зависит от интенсивности отбора.

С целью определения влияния границы на распределение притока по длине приемной части скважины проводилась серия опытов, имитирующих работу скважин в круговых пластах с различными радиусами кон-

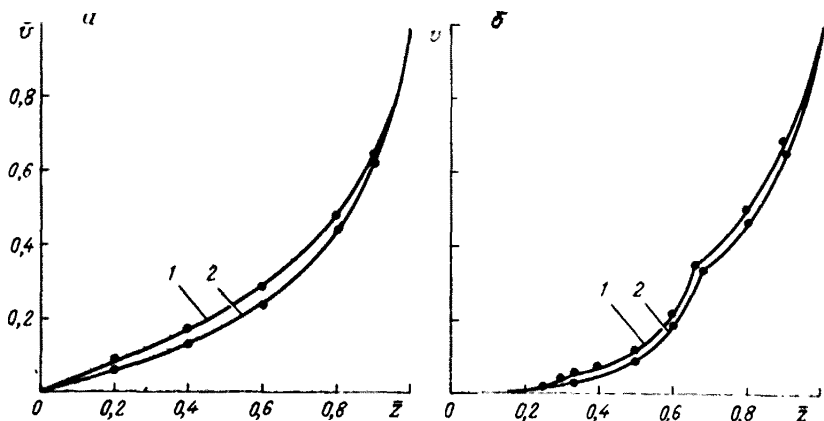


Рис. VI. 5. Графики распределения относительных скоростей по длине фильтра при различных радиусах контура питания для однородной (а) и неоднородной среды (б):

а — $m = 20$ м; 1 — $R_k = 12,5$; 20; 3000 м; 2 — $R_k = 3$ м; б — $m = 60$ м; 1 — $R_k = 40$; 60; 3000 м; 2 — $R_k = 20$ м

тура питания. В опытах задавались как одинаковые понижения уровня, так и одинаковые расходы на скважине. Пределы заданных на модели скоростей превосходили скорости потока на выходе из реальных скважин, что гарантировало достоверность выводов по результатам эксперимента. Коэффициент трения принимался равным нулю, постоянной и переменнo-произвольной величиной по длине фильтра. Полученные кривые распределения $\bar{v} = f(\bar{z})$ сравнивались между собой (рис. VI. 5). Результаты сравнения приведены также в табл. VI. 4 ($r_0 = 0,1$ м; $k = 300$ м/сут), причем относительные скорости не приводятся, а даются значения параметра притока γ , который однозначно характеризует распределение относительных скоростей (см. § 2 настоящей главы и § 3 гл. III). Сравнение выявило независимость распределения относительных скоростей от радиуса контура питания (влияния) скважины при $R_k \geq (0,3 \div 0,5)m$. Следовательно, зона существенного переформирования скоростей, т.е. зона существенной деформации потока по скорости, имеет протяженность около $(0,3 \div 0,5)m$.

Проведенный анализ распределения напоров (понижения уровня) в пласте показал, что в случае несовершенной скважины движение жидкости от контура питания до расстояния, равного $0,8 - 1,0$ мощности пласта, имеет плоско-радиальный характер. Ощутимая деформация потока начинает отчетливо проявляться с расстояния, равного половине мощности пласта, а зона существенной деформации потока отмечается в непосредственной близости от скважины (рис. VI. 6, а). Например, в верхнем

Мощность пласта (толщи) $m, м$	Относительное вскрытие \bar{m}	Радиус питания $R_K, м$	Скорость на выходе $v_L, м/с$	Понижение уровня $S_L, м$	Коэффициент трения λ	Параметр притока γ
20	1,0	3000,0	14,8	30,00	0,0	1,36
20	1,0	20,0	16,4	30,00	0,0	1,38
20	0,5*	3000	14,0	30,00	0,0	1,26
20	0,5*	20,0	15,49	30,00	0,0	1,29
20	1,0	3000,0	2,23	2,46	0,1	1,05
20	1,0	20,0	2,23	1,66	0,1	1,05
20	1,0	3000,0	2,24	3,54	0,5	1,30
20	1,0	60,0	2,24	2,90	0,5	1,30
20	1,0	20,0	2,23	2,73	0,5	1,30
20	1,0	12,5	2,27	2,66	0,5	1,30
20	1,0	3,0	2,22	2,29	0,5	1,34
60**	1,0	3000,0	3,89	18,50	Произвольный	—
60**	1,0	60,0	3,91	17,73	"	—
60**	1,0	40,0	3,94	17,62	"	—
60**	1,0	20,0	3,92	17,18	"	—

*Фильтр расположен у кровли пласта.

** Моделировалась неоднородная трехслойная толща ($k_i = 30, 100$ и 300 м/сут; $m_i = 20$ м).

сечении приемной части скважины (рис. VI. 6, а, кривая 1) потеря напора в зоне $r_0 \leq r \leq 0,25m$ составляет более 95 % от общих потерь напора в интервале $r_0 \leq r \leq m$.

Для обоснования ориентировочной протяженности зоны существенной деформации потока оценим расчетным путем дополнительные потери напора (за счет неполного вскрытия пласта) в некоторой зоне $r_0 \leq r \leq \bar{e}m$ и в интервале $r_0 \leq r < m$. Для фильтров, расположенных у кровли и подошвы пласта, примем $\bar{e}m = 0,20 \div 0,25m$, для фильтров в центре пласта $\bar{e}m = 0,10 - 0,15m$. Долю потерь напора вследствие неполного вскрытия пласта, приходящуюся на зону $r_0 \leq r \leq \bar{e}m$, определим из соотношения

$$\Delta h_{r_0 - \bar{e}m} = \frac{\bar{\xi}_1^* \left(\frac{m}{r_0} \right) - \bar{\xi}_1^* \left(\frac{m}{\bar{e}m} \right)}{\bar{\xi}_1^* \left(\frac{m}{r_0} \right)} \quad (VI. 8)$$

Согласно расчету по формуле Н.Н. Веригина

$$\bar{\xi}_1^* = \left(\frac{2}{\pi \bar{m}} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [\sin \pi n (\bar{e} + \bar{m}) - \sin \pi n \bar{e}]^2 K_0 \left(\frac{\pi n r}{m} \right),$$

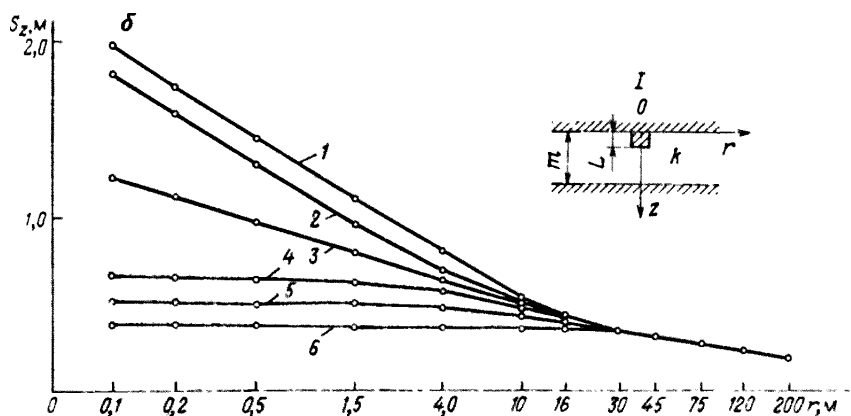
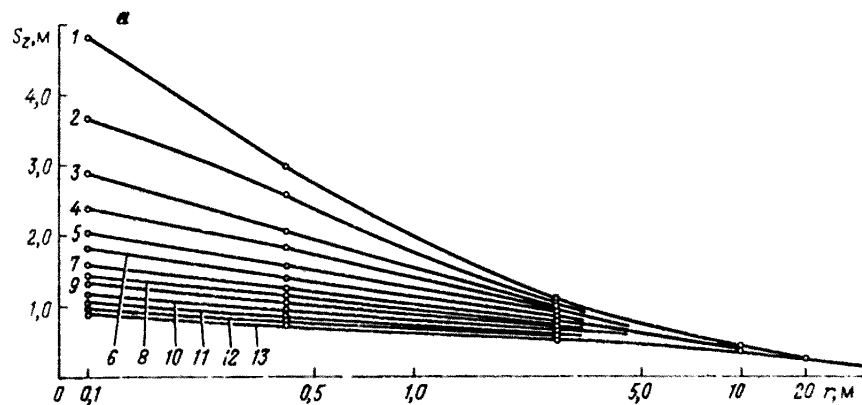


Рис. VI. 6. Графики распределения понижения уровня в пласте:

а — условия эксперимента: $m = 20$ м; 1 — $z = 20$ м; 2 — $z = 19$ м; 3 — $z = 18$ м; 4 — $z = 17$ м; 5 — $z = 16$ м; 6 — $z = 15$ м; 7 — $z = 14$ м; 8 — $z = 13$ м; 9 — $z = 12$ м; 10 — $z = 10$ м; 11 — $z = 8$ м; 12 — $z = 6$ м; 13 — $z = 5$ м; б — условия расчета: $m = 40$ м; $m = 0,25$; $L = 10$ м; $k = 300$ м/сут; $Q = 6048$ м³/сут; $R_K = 1,5\sqrt{at} = 3000$ м; 1 — $z = 2$; 2 — $z = 8$; 3 — $z = 10$; 4 — $z = 12$; 5 — $z = 16$; 6 — $z = 40$; 1 — схема вскрытия пласта

в случае квазиравномерного притока дополнительные потери напора, обусловленные деформацией линий тока в рассматриваемой зоне $r_0 \leq r \leq \epsilon m$, составляют 85 — 90 % от аналогичных потерь в интервале $r_0 \leq r \leq m$ при $m \geq 0,2$ и $m/r \geq 100$. Следовательно, зона протяженностью $r \leq 0,25m$ может быть принята за зону существенной деформации потока по напору.

Выполненные эксперименты и расчеты свидетельствуют о том, что

зона существенных деформаций потока по скорости и напору значительно меньше мощности пласта и за пределами этой зоны поток с инженерной точки зрения может приниматься плоско-радиальным, так как погрешность от пренебрежения деформацией потока в зоне $0,25m \leq r \leq m$ будет мала.

Несмотря на сходимость определения ориентировочной протяженности зоны деформации потока по двум компонентам потока все же следует признать, что ни напоры, ни скорости, взятые по отдельности, не могут однозначно характеризовать процесс фильтрации. Более универсальная мера фильтрации жидкости в породе — потенциал скорости фильтрации, который выражается в виде

$$\gamma = kH = k \left(\frac{p}{\gamma} + z \right) + c,$$

где c — постоянная.

Для кусочно-однородной толщи в качестве меры фильтрации жидкости примем величины

$$\varphi = kS \quad \text{и} \quad \Phi = \int_0^z kSdz, \quad (\text{VI. } 9)$$

которые по аналогии с однородной средой назовем соответственно приведенным потенциалом скорости фильтрации и приведенным интегральным потенциалом фильтрации. Построенные по данным модели и расчета графики $S = f(r, z)$ и $\Phi = f(r, z)$ выявили наличие зон плоско- и пространственно-радиального движения (см. рис. II. 3, II. 4 и VI. 6) и границу раздела этих зон, которую с погрешностью, приемлемой для инженерных расчетов, примем находящейся на расстоянии $r = 0,25m$ от оси скважины. Совокупность приведенных в настоящем параграфе экспериментальных и расчетных данных позволяет считать, что при решении прикладных задач притока жидкости к скважине можно выделить три характерные зоны: плоско-радиального движения, ограниченную область $0,25m \leq r \leq R_K$; существенной деформации пластового потока $r_n \leq r \leq 0,25m$, в которой движение пространственное; деформации потока в призабойном пространстве $r_0 \leq r \leq r_n$.

Как следует из графиков (см. рис. II. 3, II. 4 и VI. 6), зависимости $\Phi = f(r, z)$ в обеих зонах изображаются отрезками прямых $\Phi = A_j \ln r + B_j$ для любого расположения приемной части скважины в пласте и разной степени его вскрытия. Это свидетельствует о возможности получения более простых приближенных решений задач фильтрации жидкости к несовершенным скважинам в кусочно-однородной толще, если дифференциальные уравнения притока после их соответствующего интегрирования решать относительно приведенного интегрального потенциала фильтрации Φ .

В § 3 гл. II в качестве одного из обоснований допустимости представ-

\bar{m}	$\bar{\epsilon}$	$r = \bar{\epsilon}m$		$\bar{S} \Big _{\substack{r=r_0 \\ L \leq z \leq m}}$	$\bar{S} \Big _{\substack{r=\bar{\epsilon}m \\ 0 \leq z \leq m}}$
		расчетное	фактическое		

Данные расчета по формуле (IV. 15)

0,100	0,090	3,60	—	0,526	0,539
0,300	0,210	8,40	—	0,469	0,472
0,500	0,250	10,00	—	0,458	0,458
0,700	0,210	8,40	—	0,469	0,472
0,800	0,160	8,40	—	0,486	0,493
0,900	0,090	3,6	—	0,526	0,539

Данные модели системы пласт-скважина

0,167*	0,139	8,34	10	0,821	0,874
0,333*	0,222	13,32	13	0,607	0,741
0,500*	0,250	15,00	15	0,585	0,629
0,667*	0,222	13,32	13	0,544	0,619
0,833*	0,139	8,34	10	0,601	0,596
0,167*	0,139	8,34	10	0,542	0,527
0,333***	0,222	13,32	13	0,527	0,516
0,500***	0,250	15,00	15	0,530	0,512
0,667***	0,222	13,32	13	0,591	0,535
0,833***	0,139	8,34	10	0,598	0,565

Примечания. 1. Понижение уровня на скважине-модели $S = 1,1 \div 14,2$ м.
 2. Фильтр расположен: * у кровли, ** в середине, *** у подошвы пласта.

ления области фильтрации в виде анизотропных зон приводится утверждение о приближенном равенстве среднеинтегрального понижения уровня вне приемной части скважины (фильтра) при $r = r_0$ среднеинтегральному понижению уровня на границе раздела первой и второй зон при $r = \bar{\epsilon}m$. Это подтверждается сопоставлением величин среднеинтегральных понижений уровня (табл. VI. 5).

В настоящее время одной из математических моделей несовершенной скважины, используемой для получения зависимости между дебитом и понижением уровня в скважине без учета ее гидравлического сопротивления, является линейный сток (источник), интенсивность притока вдоль оси которого постоянна, а понижение уровня — переменная величина. Искомые расчетные формулы находятся путем усреднения понижения уровня на поверхности цилиндра радиусом r и высотой L . Исход из физической сущности отбора жидкости из скважины, при малом ее гидравлическом сопротивлении более правильным было бы задать на поверхности выделенного цилиндра одинаковое понижение. Однако, как известно, выполнение подобного условия приводит к большим трудностям

математического порядка. В связи с этим определенный интерес представляет оценка возможной погрешности в решении за счет используемой модели.

Эксперименты позволили найти разницу между математическими моделями с одинаковым понижением уровня и равномерным заданием интенсивности притока вдоль приемной части скважины.

На электрической модели имитировалась работа несовершенной скважины в однородном пласте. Частные параметры пласта и скважины принимались следующими: $R_k = 60$ м; $m = 20$ м; $k = 30$ м/сут и $Q_1 = Q_2 = 50$ л/с. При одинаковом понижении уровня вдоль приемной части скважины на модели $S = 20,3$ м, при одинаковой интенсивности притока среднеинтегральное понижение уровня $S = 20,48$ м, т.е. $\Delta S = 0,9$ %. Таким образом, после применения операции усреднения разность между понижениями уровня обеих математических моделей практически ничтожна. Кроме того, на расстояниях $r_1 = 0,4$ м и $r_2 = 2,7$ м от оси скважины, т.е. при $L/r_1 = 12,5$ и $L/r_2 = 1,85$, $m/r = 200$ и $\bar{m} = 0,5$, модельные (неусредненные) понижения уровня при $S = \text{const}$ и $dQ/dz = \text{const}$ с погрешностями соответственно не более 5 и 1,5 % могут быть приняты равными друг другу по всей мощности пласта, а на расстоянии, равном половине мощности пласта, они идентичны.

§ 3. СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ С ОПЫТНЫМИ ДАННЫМИ

Эксперименты, проведенные на электрической модели, позволили провести апробацию подавляющего большинства полученных зависимостей. В табл. VI. 6 приведены значения безразмерного разностного понижения уровня \bar{S}_z и квадрата относительной средней скорости потока \bar{v}_z^2 внутри приемной части скважины-модели, полученные расчетным путем по зависимости (III. 53) и отношению $\bar{v}_z = v_z/v_L$, исходя из величин S_z , v_z и v_L , снятых с модели. Несмотря на имеющиеся расхождения между искомыми величинами, можно считать, что равенство (III. 54) вполне удовлетворительно подтверждается опытом при разных степенях вскрытия пласта и расположения приемной части относительно его кровли и подошвы. Отклонение экспериментальной зависимости от теоретической объясняется, в первую очередь, недостаточным количеством блоков, выделенных на модели. Учитывая результат аналогичных экспериментов в фильтрационном лотке (§ 2 гл. V), можно прийти к заключению о достоверности равенства (III. 54) и возможности его использования при нахождении зависимости для определения коэффициента трения в перфорированных трубах (§ 5 гл. III) непосредственно из дифференциального уравнения (II. 9).

По мнению автора, соотношение (III. 54) можно использовать в качестве контрольной зависимости при разработке методики тарирования скважинных расходомеров.

$L, \text{м}$	\bar{m}	$z, \text{м}$	\bar{S}_z	\bar{v}_z^2	$L, \text{м}$
20	1,0	8	0,018	0,025	6,4
		12	0,054	0,069	
		16	0,189	0,189	
		19	0,537	0,534	
20	1,0	8	0,026	0,028	20
		12	0,074	0,082	
		16	0,204	0,227	
		19	0,574	0,611	
20	1,0	8	0,024	0,025	14
		12	0,072	0,076	
		16	0,216	0,231	
		19	0,636	0,656	
8	Вода	6,0	0,029	0,029	10
		7,0	0,173	0,174	
		7,5	0,419	0,419	
		7,85	0,770	0,771	

Примечание. Фильтр расположен: * у кровли, *

Таблица VI. 6

\bar{m}	$z, \text{ м}$	\bar{S}_z	\bar{v}_z^2	$L, \text{ м}$	\bar{m}	$z, \text{ м}$	\bar{S}_z	\bar{v}_z^2
Вода	5,0	0,047	0,048	5	0,25*	2,0	0,101	0,116
	5,5	0,144	0,142			3,0	0,240	0,250
	6,0	0,424	0,422			4,0	0,496	0,497
	6,25	0,728	0,723			4,5	0,700	0,715
1,0	10	0,054	0,056	5	0,25**	2,0	0,092	0,105
	15	0,186	0,186			3,0	0,219	0,227
	17	0,320	0,320			4,0	0,458	0,458
	19,5	0,782	0,780			4,5	0,665	0,678
0,7*	7,0	0,079	0,085	10	0,5**	6,0	0,143	0,149
	10,0	0,207	0,211			8,0	0,340	0,343
	12,0	0,412	0,418			9,0	0,547	0,545
	13,5	0,772	0,779			9,5	0,721	0,729
0,5*	6,0	0,160	0,170	14	0,7**	7,0	0,070	0,076
	8,0	0,374	0,385			10,0	0,188	0,188
	9,0	0,591	0,591			12,0	0,378	0,380
	9,5	0,785	0,767			13,5	0,739	0,743

* в середине пласта.

Результаты сравнения модельных и расчетных значений понижения уровня внутри приемной части совершенных и несовершенных по степени вскрытия скважин при $R_k = 0,1 \div 120$ м, $\bar{m} = 0,25 \div 1,00$; $m = 20 \div 40$ м, $r_0 = 0,1$ м приведены ниже.

Отклонение расчетных значений

S_z от модельных, %	0 – 2,5	2,5 – 5,0	5,0 – 7,5	7,5 – 10	> 10
Число наблюдений m	43	19	4	2	–
Частота m/n	0,633	0,279	0,059	0,029	–

При этом общее число наблюдений $n = 68$.

Расчетные значения S_z определялись по зависимостям (III. 51), (III. 52) и (III. 58). Сходимость модельных и расчетных зависимостей свидетельствует о достаточной точности формул для определения понижения уровня воды S_z в любом сечении приемной части и расчета параметра сопротивления фильтра F .

В табл. VI. 7, VI. 8 и VI. 9 приведены данные апробации зависимости дебита от понижения уровня в различных сечениях приемной части совершенных и несовершенных скважин, заложенных как в однородном пласте, так и в кусочно-однородной (трехпластовой) толще при одинаковых и разных напорах H в продуктивных пластах. Значения коэффициента трения λ принимались равными нулю, постоянной и переменного произвольной величине и в виде функции от интенсивности массопитока. Коэффициент истечения жидкости $\psi = 1 \cdot 10^{-2} \div \infty$.

Отклонение расчетных величин от модельных при использовании обобщенной зависимости (IV. 2) и ее частного вида, если первая производная относительного расхода заменена на выражение

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{\gamma Q}{L \operatorname{tg} \gamma} - (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma \bar{z}),$$

приведено в табл. VI. 7. В качестве параметра притока γ принималась величина, рассчитанная по соотношению (III. 18). При этом $R_k = 20 \div 3000$ м; $\bar{m} = 0,17 \div 1,00$; $m = 20 \div 60$ м; $r_0 = 0,1$ м.

Сравнение модельных и расчетных значений понижения уровня в приемной части скважины и пласте, вычисленных по формулам (III. 32), (III. 35) – (III. 37), помещены в табл. VI. 8. Понижения уровня в различных сечениях пласта определялись на расстояниях $r = 0,1; 0,4; 2,7$ и 10 м от оси скважины при расположении ее приемной части у кровли, подошвы и в центре пласта; $R_k = 60$ м; $\bar{m} = 0,25 - 1,00$ м; $m = 20$ м.

Завершающая серия апробации предложенных зависимостей понижения уровня от дебита проводилась для скважин, в которых потери напора на прохождение жидкости через приемную часть равны нулю, т.е. для квазиравномерного притока. Моделируемая толща представляла собой трехпластовую систему с тесной гидравлической связью между пластами. Отношение общей водопроницаемости неоднородной толщи к водопрони-

Таблица VI. 7

Характеристика пласта	Отклонение расчетных значений $S(z, r_0)$ от модельных, %	Число наблюдений m	Частота m/n
Неоднородный; $\bar{m} = 1,00$; $H = \text{const}$; $S = f(dQ/dz)$	0 – 2,5 2,5 – 5,0 5,0 – 7,5 7,5 – 10,0 > 10,0	36 52 23 9 11	0,275 0,397 0,175 0,069 0,084
Итого		131	1,000
Неоднородный; $\bar{m} = 0,17 \div 0,83$; $H = \text{const}$; $S = f(dQ/dz)$	0 – 2,5 2,5 – 5,0 5,0 – 7,5 7,5 – 10,0 > 10,0	22 35 17 9 6	0,247 0,393 0,191 0,101 0,068
Итого		89	1,000
Неоднородный; $\bar{m} = 1,00$; $H = \text{const}$; $S = f(dQ/dz)$	0,0 – 2,5 2,5 – 5,0 5,0 – 7,5 7,5 – 10,0 > 10,0	25 19 10 5 6	0,385 0,292 0,154 0,077 0,092
Итого		65	1,000
Однородный; $\bar{m} = 0,25 \div 0,70$; $H = \text{const}$; $S = f(\gamma)$	0 – 2,5 2,5 – 5,0 5,0 – 7,5 7,5 – 10,0 > 10,0	17 19 11 15 8	0,243 0,272 0,157 0,214 0,114
Итого		70	1

Таблица VI. 8

Расположение фильтра в пласте	Отклонение расчетных значений S_z, r_0 от модельных, %	Число наблюдений m	Частота m/n
У кровли и подошвы	0 – 2,5 2,5 – 5,0 5,0 – 7,5 7,5 – 10,0 > 10,0	85 46 14 10 5	0,531 0,288 0,088 0,062 0,031
Итого		160	1,000
В середине	0 – 2,5 2,5 – 5,0 5,0 – 7,5 7,5 – 10,0 > 10,0	43 9 6 8 6	0,597 0,125 0,083 0,112 0,083
Итого		72	1,000

Отклонение расчетных значений $S_z = f(\bar{\xi}_1^*, \bar{\xi}_2^*)$ от модель- ных, %	Число наблюдений m	Частость m/n	Отклонение расчетных значений $S_z = f(\bar{\xi}_1^*, \bar{\xi}_2^*)$ от модель- ных, %	Число наблюдений m	Частость m/n
$\bar{\xi}_1^* \neq 0; \bar{\xi}_2^* = 0$			$\bar{\xi}_1^* \neq 0; \bar{\xi}_2^* \neq 0$		
0 – 2,5	13	0,565	0 – 2,5	9	0,409
2,5 – 5,0	3	0,131	2,5 – 5,0	6	0,273
5,0 – 7,5	4	0,174	5,0 – 7,5	3	0,136
7,5 – 10,0	2	0,087	7,5 – 10,0	9	0,000
10,0	1	0,043	10,0	4	0,182
Итого	23	1,000	—	22	1,000

димости вскрытой части пласта находилось в пределах 2,9 – 29; диапазон коэффициента сопротивления за счет нарушения призабойной зоны отдельных пластов $\xi_n = -1,2 \div 5,3$ относительное вскрытие пласта задавалось $m = 0,17; 0,33; 0,67$ и $0,83$; приемная часть окважины для каждой степени вскрытия пласта располагалась у кровли подошвы и в центре пласта; мощность пласта $m = 20 \div 60$ м; результаты расчета по формулам (IV. 3), (IV. 11) – (IV. 13) и эксперимента сведены в табл. VI. 9.

Как видно из табл. VI. 7 – VI. 9, расхождение между расчетными и модельными значениями соответствующих величин находится в приемлемых пределах и, следовательно, предложенные зависимости могут быть рекомендованы к использованию в инженерных расчетах. На основании ранее проведенных исследований [4] можно предположить, что расчет будет вполне удовлетворительно согласовываться с данными лабораторных и натурных исследований, если отношение коэффициентов фильтрации пород смежных пластов неоднородной толщи $k/k_{i+1} \leq 25 - 30$.

Для определения погрешности результатов расчета по зависимости (IV. 11), при отношении $k/k_{i+1} \leq 100$ был проведен эксперимент на трехпластовой электрической модели с расположением слабопроницаемого слоя между продуктивными пластами и равенстве их мощностей. При вскрытии приемной частью скважины слабопроницаемого слоя и менее проницаемого продуктивного пласта (худший вариант) отклонение расчетных значений от модельных составило около 24 %.

Как показали исследования, приведенные в § 3 и 5 гл. III, определение неравномерности притока и потерь напора внутри приемной части при той или иной интенсивности отбора из скважины можно выполнить, если найти по зависимостям (III. 18) или (III. 19) параметр притока γ , задаваясь соответствующими значениями параметров пласта и скважины.

Таблица VI. 10

Расположения фильтра в пласте	Отклонение расчетных значений γ от модельных, %	Число наблюдений m	Частость m/n
У кровли и в сере- дине	0 – 2,5	7	0,584
	2,5 – 5,0	2	0,167
	5,0 – 7,5	1	0,083
	7,5 – 10,0	1	0,083
	$\geq 10,0$	1	0,083
Итого		12	1,000
У подошвы	0 – 2,5	3	0,231
	2,5 – 5,0	1	0,077
	5,0 – 7,5	2	0,154
	7,5 – 10,0	1	0,077
	$\geq 10,0$	6	0,461
Итого		13	1,000
Совершенная сква- жина	0 – 2,5	23	0,742
	2,5 – 5,0	8	0,258
	5,0 – 7,5	0	0,000
	7,5 – 10,0	0	0,000
	$\geq 10,0$	0	0,000
Итого		32	1,000

Вследствие практической значимости такого предварительного определения при проведении и интерпретации опытно-фильтрационных работ и проектировании эксплуатационных скважин по данным опытов были построены кривые $\bar{v} = f(\bar{z})$ и с помощью палеток (рис. 2 и 3 приложения) найдены модельные величины параметра притока γ . Результаты сравнения модельных и расчетных значений γ по формуле (III. 18) при $R_{\kappa} = 20 \div 3000$ м; $\bar{m} = 0,25 \div 1,00$; $m = 20 \div 80$ м; $\psi = 1 \cdot 10^{-2} \div \infty$; $r_0 = 0,1$ приведены в табл. VI. 10. Сравнение свидетельствует о достаточно удовлетворительном совпадении опыта и расчета. Наибольшее отклонение отмечается при расположении приемной части скважины у подошвы пласта. Это объясняется тем, что в обработку материала включены практически все проведенные эксперименты, тогда как первые серии опытов проводились с равномерной разбивкой сечений модели по вертикали и малым количеством блоков.

Результаты и анализ проведенного сравнения позволяют считать, что зависимость (III. 18) может использоваться в гидрогеологической практике для расчета параметра притока γ , потерь напора внутри приемной части и оценки степени влияния гидравлического сопротивления скважины на приток воды.

В § 5 гл. III приведены формулы (III. 59) для определения коэффи-

циента трения при движении жидкости в скважине и перфорированных сборниках. По этим формулам рассчитывались частные значения коэффициента трения исходя из величин напоров h , выходной скорости v_L или местной средней скорости потока v_z , полученных на модели. Сравнение вычисленных и заданных на модели значений λ при $R_k = 60 \div 3000$ м; $m = 0,25 \div 1,00$; $m = 20 \div 40$ м; $r_0 = 0,1$ м по формулам (II. 9) и (III. 59) приведено ниже

Отклонение расчетных значений

λ от модельных, %	0—2,5	2,5—5,0	5,0—7,5	7,5—10	>10
Число наблюдений m	38	38	10	2	7
Частота m/n	0,400	0,400	0,105	0,021	0,074

Сравнение значений λ показывает достаточно хорошую сходимость и, следовательно, возможность применения формулы (III. 59) в практических расчетах. На модели коэффициент трения задавался постоянной и переменнo-произвольной величиной по длине приемной части и в виде функции от массопитока: $\lambda = f(u/\bar{v})$ и $\lambda = \varphi(\sqrt{u/\bar{v}})$.

В § 2 гл. IV показано, что коэффициент дополнительного сопротивления ξ_2^* , обусловленный нарушением призабойной зоны и прерывистостью поступления жидкости в приемную часть скважины, является функцией степени вскрытия пласта. Это имеет важное значение, в частности, при интерпретации результатов откачки из несовершенных разведочных скважин и последующем определении величины дополнительной срезки уровня в проектируемых эксплуатационных скважинах. Согласно зависимости (IV. 12) коэффициент ξ_2^* характеризует дополнительное сопротивление в призабойной зоне, возникающее при данной степени вскрытия пласта, и по нему нельзя судить о фильтрационных свойствах пород призабойной зоны. Нарушение естественной структуры пород в этой зоне можно оценить только на основе величины коэффициента ξ_n , не зависящего от степени вскрытия пласта.

Апробация приведенного положения проводилась для условий однородной толщи при незначительности величины дополнительного сопротивления ξ_ϕ . Таким образом, влияние неоднородности пласта и прерывистости поступления жидкости в приемную часть скважины было устранено. Модель имитировала приток жидкости в несовершенные скважины при мощности пласта $m = 20$ м, радиусе контура питания $R_k = 20$ м, внешнем радиусе призабойной зоны $r_n = 0,5$ м, радиусе скважины $r_0 = 0,1$ м, коэффициентах фильтрации пласта и призабойной зоны, соответственно равных $k = 70$ м/сут и $k_r = 300$ м/сут. Скважины располагались в середине и у кровли пласта. Эксперимент для всех вариантов проводился при понижении $S = 1,5$ м. Суммарный коэффициент дополнительного сопротивления $\Sigma \xi^* = \xi_1^* + \xi_2^*$ рассчитывался по выражению

$$\Sigma \xi^* = \frac{2\pi kmS}{Q_m} - \ln \frac{R}{r_0},$$

\bar{m}	Расположение фильтра в пласте									
	у кровли					в середине				
	$Q_M, \text{л/с}$	$\Sigma \xi^*$	ξ_1^*	ξ_2^*	ξ_n	$Q_M, \text{л/с}$	$\Sigma \xi^*$	ξ_1^*	ξ_2^*	ξ_n
0,2	11,6	7,87	14,30	-6,43	-1,29	14,30	5,38	11,5	-6,12	-1,22
0,3	15,4	4,62	8,84	-4,22	-1,27	18,10	3,14	7,25	-4,11	-1,23
0,5	22,0	1,64	3,93	-2,29	-1,15	23,80	1,12	3,24	-2,12	-1,06

где km и S — соответственно заданные на модели проводимость пласта и понижение уровня воды; Q_M — дебит скважины, полученный по модели при заданном понижении уровня. Величина ξ_2^* находилась как $\xi_2^* = \Sigma \xi^* - \xi_1^*$, где ξ_1^* рассчитывалась по формуле Н.Н. Веригина. Коэффициент дополнительного сопротивления, обусловленный нарушением естественной структуры пород призабойной зоны, принимался согласно (IV. 12) $\xi_n = \bar{m} \xi_2^*$. Результаты моделирования и расчета представлены в табл. VI. 11.

Как видно из табл. VI. 11, коэффициент ξ_2^* является функцией степени вскрытия пласта, а коэффициент ξ_n практически постоянен и может быть принят в качестве характеристики фильтрационных свойств пород призабойной зоны. Имеющиеся расхождения между значениями ξ объясняются погрешностями эксперимента. Согласно выражению (IV. 12) истинная (заданная на модели) величина $\xi_n = 1,23$.

В § 3 гл. IV введено понятие "нейтральная точка" и даны зависимости для нахождения ее ординаты. Апробация предложенных зависимостей осуществлялась применительно к однопластовой и трехпластовой системам. Фактическая ордината нейтральной точки определялась по точке внутри приемной части скважины-модели, в которой модельное понижение уровня воды равнялось вычисленному по формуле

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r_0} \frac{R}{r_0}.$$

При использовании зависимостей (IV. 33) и (IV. 34) вначале рассчитывались значения первой производной расхода dQ/dz в соответствии с заданными на модели значениями дебита Q , суммарной проводимостью толщи km и коэффициентом фильтрации k_z . Далее на основании опытной зависимости $Q = f(z)$ определялись модельные величины dQ/dz . Ордината рассчитанной нейтральной точки находилась по точке, где вычисленные и модельные величины dQ/dz оказывались близки между собой. Нейтральная точка рассчитывалась по зависимости (IV. 36) исходя из экспериментального значения параметра притока γ , заданной длины фильтра и степени вскрытия пласта. Коэффициент φ вычислялся по (IV. 32). При использовании графоаналитического метода ордината нейтральной точки находилась по точке касания графика $Q = f(z)$ с линией, которая параллельна прямой, идущей из начала координат под углом $\alpha = \arctg(L \varphi/m)$.

Фактические и расчетные интервалы нахождения нейтральной точки z_H по формуле (IV. 33) для неоднородной толщи приведены ниже.

Степень вскрытия пласта m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,83*	0,83*	0,67**
Фактический интервал z_H , м	28–29	26–27	25–26	52–53	51–52	50–51	17–18	24–25	22 – 23
Расчетный интервал z_H , м	29–30	27–28	25–26	52–53	51–52	50–52	17–18	25–26	22 – 23

Фактические и расчетные ординаты z_H для однородного пласта следующие:

Степень вскрытия пласта m	1,0	0,7*	0,7**	0,7***
Фактическая ордината z_H , м	13,80	6,70	7,25	7,36
Расчетная ордината z_H , м:				
по формуле				
(IV. 34)	14,20	7,00	7,40	7,50
(IV. 36)	13,70	6,80	7,24	7,06
графоаналитическим методом	14,00	7,00	7,60	7,70

Примечание. Фильтр расположен: *у кровли, **у подошвы, ***в середине пласта.

Результаты свидетельствуют об удовлетворительном совпадении искоемых величин.

Использование свойств нейтральной точки представляет существенный интерес в нескольких аспектах. В частности, при моделировании скважин на сплошных моделях ЭГДА, возможности которых значительно ограничены по сравнению с сеточными моделями, непосредственный учет гидравлического сопротивления приемной части чрезвычайно затруднен. Однако расчет производительности скважин с учетом их гидравлического сопротивления все же можно выполнить, если работу провести в два этапа. На первом этапе производится моделирование общепринятым способом [16, 23, 42, 43]. При этом найденные понижения уровня в скважинах адекватны понижениям в нейтральных точках. Прибавляя к полученным понижениям уровня (разности давлений) дополнительные потери напора Δh_H от нейтральной точки до выходного сечения L и потери напора в глухих трубах Δh_r , рассчитываемые по (IV. 29) – (IV. 31) и номограммам (рис. 1 приложения), определим фактические динамические уровни. Знание хотя бы приближенной ординаты нейтральной точки позволяет оценить достоверность расчетного значения коэффициента фильтрации пород многослойной толщи, если он определяется экспрессным методом расходомерии скважин.

В связи с особой актуальностью улучшения теоретического обоснования экспрессных методов опробования скважин приведем некоторые соображения аналитического порядка и экспериментальный материал

по функциональным связям между интенсивностью притока, коэффициентом фильтрации пород и дебитом скважины, в общем случае несовершенной по степени вскрытия и совершенной по характеру распределения притока.

В частности, при малых потерях напора на трение и преодоление сил инерции для случая несовершенной по степени вскрытия скважины аналитическим путем получено:

$$\frac{(\Delta Q / \Delta m) |_{r=r_0}}{k_z} = \frac{Q}{k_L L} \quad (VI. 10)$$

Из выражения (VI. 10) следует, что отношение средней интенсивности притока к коэффициенту фильтрации пород в квазиоднородной зоне равно отношению дебита скважины к проводимости неоднородной толщи в пределах ее вскрытой части.

Указанное соотношение будет близко к действительному в середине любой квазиоднородной зоны и давать отклонения в краевых ее частях за счет несоответствия фактической и усредненной по зоне интенсивностей притока.

В качестве примера возможных отклонений значений фактической интенсивности притока от осредненной ниже помещены экспериментальные данные по моделированию однородной среды при заданном постоянном понижении уровня вдоль приемной части скважины-модели:

\bar{m}_n	0,70		0,50		0,25				
$z, \text{ м}$	2	15	17	2	10	19	2	5	9
dQ/dz	2,36	2,39	3,08	3,25	3,34	4,43	6,47	6,71	8,26
$\Delta Q/\Delta m$	2,49		3,50		7,00				

Для проверки возможности применения в инженерных расчетах отношения (VI. 10) использовались опыты, имитирующие отбор жидкости из скважины, заложенной в неоднородной толще при заданном постоянном понижении уровня вдоль приемной части. Результаты сравнения фактического и расчетного отношений средней интенсивности притока к коэффициенту фильтрации пород квазиоднородной зоны $n = (\Delta Q / \Delta m) / k_z$ приведены ниже.

Отклонение расчетных величин от модельных, %	0 – 2,5	2,5 – 5,0	5,0 – 7,5	7,5 – 10	> 10
Число наблюдений m	14	4	3	3	6
Частость m/n	0,467	0,133	0,100	0,100	0,200

Из приведенных данных следует, что зависимость (VI. 10) достаточно достоверно отображает соотношения между притоком и проницаемостью пород.

Уравнения (II. 43) и (IV. 3) позволяют получить и более общие по сравнению с приведенными зависимости расходов жидкости, поступаю-

щих в отдельные интервалы приемной части скважины от фильтрационных свойств пород неоднородной толщи.

Так, применительно к кусочно-однородной толще с практически постоянным значением коэффициента фильтрации пород в пределах отдельных зон и при одинаковом понижении уровня вдоль приемной части после интегрирования уравнения (II. 43) или (IV. 3) от 0 до L получим

$$\bar{\xi}_1^* = \left(\frac{km}{QL} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{k_i} - 1 \right) \ln \frac{\epsilon m}{r_0}. \quad (\text{VI. 11})$$

Приравнявая правые части выражений (VI. 11) и (IV. 11), будем иметь

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_i}{k_i} = \frac{Q}{k_L}, \quad (\text{VI. 12})$$

где ΔQ_i — приток в скважину в интервале однородного слоя (зоны); k_i — коэффициент фильтрации этого же слоя (зоны).

Апробация зависимости (VI. 12) показала приемлемую сходимость расчетных и модельных величин. Сравнение расчетных и модельных

отношений $n = \sum_i \frac{Q_i}{k_i}$ приведены ниже.

Отклонение расчетных величин от модельных,

%	0—2,5	2,5—5,0	5,0—7,5	7,5—10	> 10
Число наблюдений m .	9	4	3	2	1
Частота m/n	0,474	0,210	0,158	0,105	0,053

Помимо изложенного выше, эксперименты на электрической модели позволили также оценить принципиальную возможность использования полученных зависимостей и определить границы применения ранее предложенных выражений для послойного определения коэффициента фильтрации пород методом расходомерии скважин.

§ 4. УЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ ПОТОКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ НА СЕТКАХ $R-R$

В настоящее время на моделирующих сетках скважина представляется в виде поверхности равного потенциала. В узловую точку сетки вводится добавочное сопротивление, учитывающее резкую концентрацию потока вблизи скважины. Величина вводимого добавочного сопротивления определяется зависимостью, вывод которой основывается на следующих

допущениях: напор по вертикали в любом из сечений фильтрационного поля постоянен, в пределах блока со скважиной поток имеет плоско-радиальный характер. Таким образом, коэффициент несовершенства скважины по степени вскрытия и падение напора вследствие преодоления сил инерции и турбулентного трения внутри приемной части скважины принимаются равными нулю, а распределение притока вдоль ее длины равномерным.

Наличие в пласте дополнительного гидравлического сопротивления в виде скважин неизбежно вызывает деформации потока, которые при интенсивном отборе жидкости оказывают влияние на распределение притока и давления по длине приемной части скважины. Следовательно, при решении инженерных задач в ряде случаев кроме неоднородности фильтрационных и емкостных свойств пород, взаимодействия пластов между собой, изменения во времени граничных условий и других факторов необходимо учитывать также и гидравлику скважин.

С целью учета гидравлического сопротивления скважины и деформаций потока вблизи нее предлагается моделировать изучаемую область фильтрации с помощью составной модели или путем последовательного фрагментирования отдельных блоков, в пределах которых находятся скважины. В первом случае модель участка пласт — скважина длиной, соответствующей половине или всей мощности эксплуатируемого пласта, непосредственно подключается к модели области фильтрации. Во втором случае вначале проводится эксперимент на обычной модели, а затем на модели системы пласт — скважина (см. рис. VI. 1).

Методика учета фильтрационных и емкостных свойств пород, задания граничных условий области фильтрации, аппроксимация границ месторождения, выбор масштабных коэффициентов и монтаж обычной модели выполняются в соответствии с рекомендациями и указаниями, изложенными в работах [11, 23, 28, 42]. Различие состоит лишь в том, что в узловых точки блока со скважиной вводится дополнительное активное сопротивление

$$\Phi^0 = \Phi_6 - \Sigma \Phi_c, \quad (\text{VI. } 13)$$

где Φ_6 — фильтрационное сопротивление участка в пределах выделенного блока от его внешних границ до $r = m$ или $r = 0,5m$; $\Sigma \Phi_c$ — сумма фильтрационных сопротивлений, эквивалентных сопротивлениям квадрата сетки (рис. VI. 7).

Для определения сопротивления фрагмента блока от его внешних границ до $r = m$ или $r = 0,5m$ рассмотрим проводящую среду, ограниченную произвольным внешним контуром.

Предположим, что в проводящей среде произвольной конфигурации (рис. VI. 8, а) протекает постоянный ток от внешнего контура к электроду, расположенному внутри области F . Определим общее сопротивление среды, для чего разобьем область F на ряд элементарных секторов с внут-

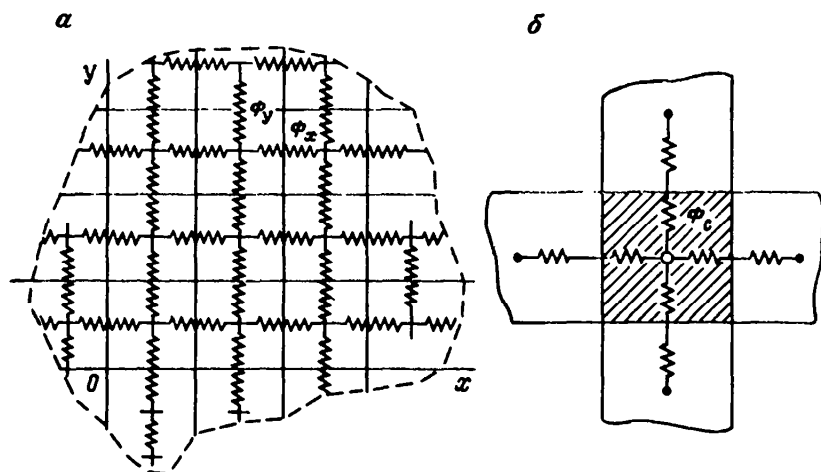


Рис. VI. 7. Сетка фильтрационных сопротивлений (а) и фильтрационное сопротивление блока (б)

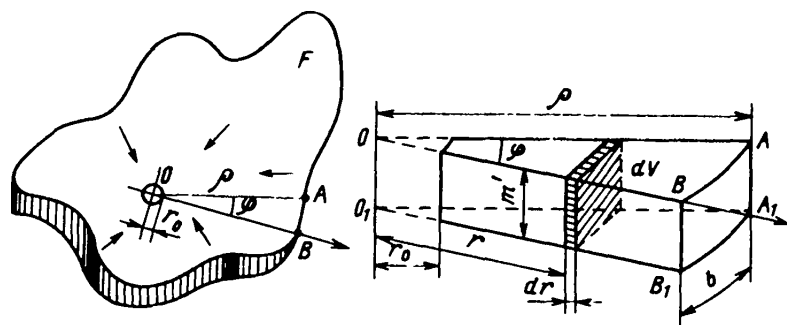


Рис. VI. 8. Схема к определению сопротивления произвольного объема

ренным углом φ (рис. VI. 8, б). В этом случае сопротивление заштрихованного объема dv

$$dR = \rho \frac{dr}{m' \varphi r}, \quad (\text{VI. 14})$$

где ρ — удельное сопротивление токопроводящей среды; m' — высота токопроводящего объема dv .

Интегрируя (VI. 14), получим выражение для определения сопротивления элементарного сектора

$$R_c = \frac{\rho}{m' \varphi} \cdot \int_r^{\rho} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{m' \varphi} \ln \frac{\rho}{r}.$$

Общее сопротивление области F следует рассматривать как сумму элементарных секторов, соединенных параллельно. Поэтому изменение R_c в зависимости от угла φ можно выразить следующим образом:

$$d\left(\frac{1}{R_c}\right) = \frac{m'}{\rho \ln \frac{\rho(\varphi)}{r}} d\varphi, \quad (\text{VI. 15})$$

где $\rho(\varphi)$ — функция от угла; r — параметр.

Проинтегрировав уравнение (VI. 15), найдем общее сопротивление рассматриваемой области

$$\frac{1}{R_F} = \frac{m'}{\rho} \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\ln \frac{\rho(\varphi)}{r}}$$

или в окончательном виде для фильтрационного сопротивления произвольного контура при течении жидкости к скважине

$$\Phi = \frac{1}{km \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\ln \frac{\rho(\varphi)}{r}}}. \quad (\text{VI. 16})$$

Отсюда фильтрационное сопротивление участка в пределах блока-квадрата от его внешних границ до $r = m$ или $r = 0,5m$

$$\Phi_6 = \frac{1}{\pi km \left(\frac{1}{\ln \frac{\Delta x}{2r}} + \frac{1}{\ln \frac{\Delta x}{r\sqrt{2}}} \right)},$$

где Δx — линейный размер прямоугольного блока; r — расстояние, равное половине или всей мощности пласта (радиус "укрупненной скважины").

Сумма фильтрационных сопротивлений, эквивалентных сопротивлениям квадрата сетки,

$$\Sigma \Phi_c = 1/(8km).$$

Следовательно, в узловую точку блока со скважиной должно вводиться

дополнительное активное сопротивление, эквивалентное следующему фильтрационному сопротивлению:

$$\Phi_1^0 = \left[\frac{1}{\pi k m \left(\frac{1}{\ln \frac{\Delta x}{r}} + \frac{1}{\ln \frac{\Delta x}{r\sqrt{2}}} \right)} - \frac{1}{8 k m} \right]. \quad (\text{VI. 17})$$

Полученное точное выражение (VI. 17) можно упростить, если блок-квадрат заменить равновеликим кругом, т.е. принять $\pi r^2 = \Delta x^2$.

Тогда согласно (VI. 16) и (VI. 13)

$$\Phi_6 = \frac{1}{k m \int_0^{2\pi} d\varphi / \ln \frac{\Delta x}{r\sqrt{\pi}}} \quad \text{и} \quad \Phi_2^0 = \frac{1}{2\pi k m} \left[\ln \frac{\Delta x}{r\sqrt{\pi}} - \frac{\pi}{4} \right]. \quad (\text{VI. 18})$$

Отсюда окончательно для добавочного активного сопротивления получим

$$R_d = \frac{1}{2\pi k m} \left[\ln \frac{\Delta x}{r\sqrt{\pi}} - \frac{\pi}{4} \right] \frac{1}{\alpha_R}, \quad (\text{VI. 19})$$

где $\alpha_R = \Phi/R$ — масштабный коэффициент сопротивления.

В случае составной модели добавочное омическое сопротивление подключается к модели участка пласт — скважина. При фрагментировании на модель участка пласт — скважина подается относительный потенциал, снятый с добавочного сопротивления. Во избежание погрешностей при пользовании приведенными формулами следует учитывать, что линейный размер блока-квадрата должен быть гораздо больше размера радиуса "укрупненной скважины".

С целью уточнения приемлемых соотношений размеров блока и радиуса "укрупненной скважины", а также для выявления расхождения в величинах добавочных фильтрационных сопротивлений по точной зависимости (VI. 17), приближенной зависимости (VI. 18) и формуле В.М. Шестакова определялось их отношение при различных линейных размерах блока и радиуса "укрупненной скважины". Согласно В.М. Шестакову

$$\Phi^0 = \frac{1}{2\pi k m} \left[\ln \frac{\Delta x}{r} - A \right], \quad (\text{VI. 20})$$

где A — коэффициент.

Значение A согласно данным моделирования на сеточном интеграторе и на модели ЭГДА находится в пределах 1,43 — 1,60 в зависимости от раз-

Таблица VI. 12

$\Delta x, \text{ м}$	$r_0 = 0,1 \text{ м}$			$r = 20 \text{ м}$				$r = 50 \text{ м}$	
	n_1	$n_2 \text{ при } A$		n_1	$n_2 \text{ при } A$		n_1	$n_2 \text{ при } A$	
		1,43	1,60		1,43	1,60		1,43	1,60
10	1,014	1,037	1,096	—	—	—	—	—	—
20	1,012	1,031	1,078	—	—	—	—	—	—
50	1,010	1,025	1,063	—	—	—	—	—	—
100	1,009	1,022	1,055	1,099	1,542	2,930	—	—	—
200	1,008	1,020	1,048	1,038	1,124	1,396	—	—	—
400	1,007	1,018	1,043	1,025	1,072	1,202	1,046	1,162	1,575
600	1,007	1,017	1,041	1,021	1,058	1,158	1,033	1,104	1,316
800	1,006	1,016	1,039	1,018	1,051	1,137	1,028	1,083	1,240
1000	1,006	1,015	1,038	1,017	1,047	1,124	1,025	1,072	1,202
2000	1,006	1,014	1,035	1,014	1,037	1,096	1,018	1,051	1,36
4000	1,005	1,013	1,032	1,012	1,031	1,078	1,015	1,040	1,103

бивки фильтрационного поля на блоки. Результаты расчета приведены в табл. VI. 12 ($n_1 = \Phi_1^0/\Phi_2^0$ и $n_2 = \Phi_1^0/\Phi_0^0$).

Как видно из сравнения, при малом диаметре скважины, расхождение между величинами добавочных фильтрационных сопротивлений по всем формулам незначительное. При моделировании "укрупненной скважины" погрешность при использовании приближенной формулы (VI. 18) составляет для $\Delta x > 5r$ и $\Delta x \geq 8r$ соответственно менее 10 и 5 %.

Выводы

1. Анализ совокупности экспериментальных данных распределения притока, напоров и интегрального потенциала фильтрации в гидродинамически несовершенной скважине и пласте показал, что характер распределения средних скоростей потока и напора внутри приемной части практически не зависит от формы и удаленности внешних границ пласта, если его протяженность более половины мощности пласта. С инженерной точки зрения зону деформации потока по скорости и напору можно принять равной четверти мощности пласта. В области фильтрации от ее внешних границ до скважины можно выделить три характерные зоны: практически плоско-радиального движения, ограниченную интервалом $0,25m \leq r \leq R_k$; существенной деформации потока $r_n \leq r \leq 0,25m$, в которой движение пространственно-радиальное; деформации потока в призабойном пространстве $r_0 \leq r \leq r_n$. Разделение области фильтрации на зоны по виду движения и характеру деформации потока и использование в качестве меры фильтрации интегрального потенциала фильтрации в не-

которых случаях может существенно упростить решение задач фильтрации жидкости к скважине в слоистой толще.

2. Исследования на электрической модели, проведенные в широком диапазоне параметров пласта и скважины и подтвержденные экспериментами в фильтрационных лотках и натурных условиях, свидетельствуют о том, что распределение притока в приемной части по закону тангенсов или гиперсинусов является одним из свойств процесса истечения жидкости из пласта в скважину. Следовательно, зависимости $\bar{v} = \operatorname{tg} \gamma \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma$ и $\bar{v} = \operatorname{sh} \alpha \bar{z} / \operatorname{sh} \alpha$ в общем случае могут быть выбраны в качестве аппроксимирующих функций при приближенном решении задач притока жидкости к скважине для целей инженерной практики.

В связи с неравномерностью распределения притока по длине приемной части скважины при интенсивном отборе жидкости расход, протекающий через боковую поверхность приемной части, возрастает по мере удаления от забоя, и в пределе почти весь объем извлекаемой воды может поступать через верхнюю часть фильтра. Это необходимо учитывать при проектировании конструкций скважин.

3. Апробация зависимостей для определения параметра притока γ , ординаты нейтральной точки, коэффициента турбулентного трения и снижения напора в скважине с учетом ее гидравлического сопротивления показала приемлемую сходимость расчетных и модельных величин. Следовательно, предложенные зависимости с достаточной для практики точностью могут быть использованы в расчетах совершенных и несовершенных по степени вскрытия скважин, заложенных как в однородной среде, так и в неоднородной толще. Согласно приведенным зависимостям гидравлическое сопротивление скважины следует учитывать при расчетных значениях параметров притока $\gamma \geq 0,6$ и $\alpha \geq 1,0$. В противоположность существующим методам постепенного приближения или априорного задания распределения скорости движения по длине приемной части предлагаемые для расчета коэффициента турбулентного трения зависимости дают возможность непосредственного определения λ при любых законах распределения средней скорости потока и перфорации приемной части скважины или сборника с проницаемыми стенками.

4. В настоящее время в практику гидрогеологических исследований широко внедряются методы послойного определения коэффициентов фильтрации пород с помощью расходо- и резистивиметрии скважин. Ввиду влияния гидравлического сопротивления скважины на распределение притока внутри приемной части разработку и совершенствование геофизических методов оценки фильтрационных свойств пород необходимо проводить с учетом основных закономерностей движения потока в скважине, т.е. на качественно иной основе. Использование метода расходомерии представляет значительный интерес и для непосредственного изучения гидравлических характеристик скважин. Зная распределение скоростей по длине приемной части скважины, можно установить параметр внутрен-

него сопротивления F и коэффициент истечения жидкости ψ . Таким образом, применение комплекса откачки и метода расходомерии позволяет решать вопросы гидравлики скважин и определения параметров пласта.

Глава VII

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПЬЕЗОРАСХОДОМЕТРИИ СКВАЖИН

§ 1. ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД

Определение степени и характера неоднородности продуктивных горизонтов — одна из актуальных проблем, так как достоверность решения практических задач фильтрации воды, нефти и газа зависит в первую очередь от знания особенностей строения пластов и их свойств на исследуемой площади.

Практикой разработки месторождений нефти, газа, пресных, промышленных и минеральных вод установлено, что такие показатели, как коэффициенты извлечения нефти, газа и промышленных вод, интенсивность продвижения вод к нефтяным и газовым скважинам, засоление подземных вод на водозаборах и взаимодействие эксплуатационных скважин не могут быть оценены достоверно без учета степени неоднородности продуктивной толщи [6, 26].

Проведенные исследования и опыт эксплуатации показывают, что характеристики разработки (срок добычи, дебиты скважин, степень их взаимодействия, динамика продвижения контура некондиционных вод, водонефтяного или водогазового контакта и т.п.) зависят не от средних значений параметров продуктивной толщи, а от значений параметров отдельных пропластков, слоев и интервалов продуктивного горизонта, их взаимного расположения и степени гидравлической связи между ними.

Чрезвычайно важно определение неоднородности разреза при выборе наиболее перспективных участков для создания подземных газохранилищ (ПГХ) в водоносных пластах и при обосновании технологической схемы эксплуатации. Оценка фильтрационной неоднородности разреза в этом случае позволит выявить пригодность участка в качестве природной емкости (с точки зрения ее сообщаемости со смежными водоносными горизонтами), более достоверно выбрать горизонты, в которые могут быть сброшены пластовые воды с целью разгрузки основного водоносного горизонта в процессе закачки газа, а также увеличить надежность расчетов по оттеснению и вторжению пластовых вод при эксплуатации ПГХ.

Большое значение имеет оценка неоднородности разреза при гидротех-

ническом строительстве и проектировании глубоких шахт. Разделение толщи горных пород на зоны с разной проницаемостью дает возможность заранее предусмотреть определенные типы и конструкции противофильтрационной защиты, а также рассчитать фильтрационные потери через основание сооружения и ожидаемые притоки в стволы шахт.

Тщательное изучение степени и характера неоднородности продуктивных горизонтов особенно важно на современном этапе исследований, когда в практику работ широко внедряются аналоговые, цифровые и гибридные машины с их большими возможностями набора параметров пластов и задания в фильтрационном поле соответствующих начальных и граничных условий. С применением АВМ и ЭЦВМ появилась возможность предсказывать ход процесса разработки месторождений в неоднородных толщах. Однако для этого необходимо наличие данных, достаточно полно характеризующих изменчивость фильтрационных характеристик пласта в плане и разрезе.

В настоящее время проводимость (проницаемость) пластов изучается с помощью лабораторно-экспериментальных, гидродинамических и геофизических методов.

Лабораторно-экспериментальные исследования относятся к группе локальных исследований, для которых характерны малый объем информации, зависимость результатов опробования от выбора интервалов и участков отбора керна, его представительности, нарушение первичной структуры и текстуры породы, а также малая надежность экстраполяции локальных значений проницаемости по пространству. Можно с большей степенью вероятности предположить, что количество образцов никогда не будет достаточным для надежного определения фильтрационных характеристик многослойной толщи. Кроме того, применяемые в сегодняшней практике лабораторные методы непригодны для исследования трещиноватых коллекторов.

Традиционные гидродинамические методы исследования эксплуатационных скважин являются сугубо интегральными. В частности, при поисково-разведочных работах в качестве основных методов исследования фильтрационных свойств продуктивных горизонтов и взаимодействия скважин используют методы падения, восстановления давления и установившихся отборов. К сожалению, существующие способы анализа реакции пласта на вызываемое возмущение (откачки или нагнетания) позволяют определить лишь осредненные параметры возмущенной зоны, которая в общем случае может быть существенно неоднородной. Помимо фильтрационных свойств пород расчетные значения параметров включают граничные условия области возмущения и особенности расположения скважин на участке. Причем по виду графика прослеживания трудно установить относительную величину влияния каждого из указанных факторов, а следовательно, нельзя установить степень усреднения полученных параметров. При устройстве в зоне возмущения наблюдательных

скважин возможно определение частных значений проводимости отдельных кусочно-однородных пластов, если их не более двух. Для трехслойной толщи проводимости разных слоев могут быть рассчитаны путем последовательного приближения при выполнении откачек из каждого слоя. Определение проводимости в многослойной толще практически неосуществимо. Это связано с тем, что задача определения характера и степени неоднородности¹ водоносной толщи как в плане, так и в разрезе не имеет до сих пор надлежащего аналитического решения. При этом трудности в определении параметров неоднородной толщи носят принципиальный характер: предложенные алгоритмы предопределяют знание геометрии соответствующих зон неоднородности.

Такие общепринятые геофизические методы исследования, как гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтронный гамма-метод, ультразвуковой каротаж и другие, дают локально-интегральную характеристику. Однако интерпретация полученных данных затруднена вследствие неопределенности корреляционной связи между зафиксированными геофизическими параметрами и проницаемостью пород.

В последние годы в практику гидрогеологических работ начали внедряться экспрессные методы исследований скважин: мгновенные возмущения напора с последующей регистрацией изменения уровня (налив фиксированного объема жидкости в скважину, спуск в скважину емкости, отжатие уровня подачей сжатого воздуха), опережающее опробование (откачка воды из фильтра-опробователя, внедряемого в пласт гидроподъемом) и опробование скважин испытателями пластов. Ввиду небольших размеров зоны возмущения эти экспресс-методы дают возможность получить дифференцированную характеристику фильтрационных свойств пород и их можно отнести к группе локально-интегральных методов. Согласно данным, опубликованным В.С. Алексеевым, А.Д. Курманенко, М.И. Фазлуллиным, при незначительном сопротивлении приемной части скважины и малом нарушении призабойной зоны расчетные значения коэффициентов фильтрации пород близки к истинным.

К группе локально-интегральных методов следует отнести также и метод расходомерии скважин, который, по мнению автора, является наиболее надежным методом послойного определения фильтрационных свойств пород в разрезе, так как в основу его положен очевидный принцип однозначного соответствия между интенсивностью притока при действующем понижении и проводимостью слоя в фиксированном интервале. При соответствующей доработке методики интерпретации и использовании во время вскрытия пласта легко растворяющихся буровых растворов этот метод позволит получить наиболее близкое к действительности представление о распределении проницаемости по мощности неоднородной толщи.

¹ В настоящей работе под неоднородностью подразумевается непостоянство значений коэффициента проводимости (проницаемости).

Сущность применяемого метода расходомерии заключается в измерении скоростей осевого потока или расходов внутри приемной части скважин, вычислении бокового притока и последующего расчета коэффициента фильтрации слоя исходя из пропорциональности бокового притока ΔQ коэффициенту фильтрации породы k .

Идея использования измерений скоростей осевого потока воды для определения границ водоносного горизонта и величин притока вдоль приемной части скважины впервые была высказана Н.А. Огильви в 1939 г. Однако предложенная им методика долгое время не находила применения из-за отсутствия технических средств, позволяющих проводить оперативные измерения скоростей (расходов, дебитов) внутри ствола скважины. Лишь в 50-х годах в нефтепромысловых исследованиях начинают использоваться глубинные дебитомеры с местной регистрацией, а затем и с дистанционной. В гидрогеологической практике производственное внедрение расходомеров (дебитомеров) началось в 60-х годах.

Глубинные дебитомеры и расходомеры применяются для изучения профилей притока и приемистости нефтяных и нагнетательных скважин с целью определения характера притока и поглощения жидкости по мощности продуктивного пласта, качественной оценки эффективности мероприятий по увеличению проницаемости призабойной зоны, изучения характера обводнения скважин, установления затрубной циркуляции жидкости и оценки герметичности эксплуатационных колонн.

При гидрогеологических изысканиях расходомеры вначале применялись для выделения границ водоносных горизонтов и определения интенсивности притока в пределах отдельных слоев. По мере внедрения расходомерии скважин выявилась возможность ее использования для количественного определения фильтрационных свойств исследуемых пластов. Значительный вклад в разработку интерпретации расходомерии внесли И.М. Гершанович, И.И. Гринбаум, В.Ф. Прейс, М.С. Ровинский, Э.Я. Кипко, Э.Д. Кузьменко и др. Их работы были направлены на создание метода послойного определения фильтрационных свойств пород на основе изменения величины расхода в различных сечениях приемной части скважины и последующего расчета коэффициента фильтрации пород по общеизвестным формулам Ж.Дюпюи, Ч.Тэйса или их модификациям. Таким образом, методика интерпретации расходограмм основывалась на допущении о плоско-радиальном характере движения жидкости и равномерном распределении притока вдоль приемной части скважины в пределах однородного слоя при любой интенсивности притока. Данное допущение справедливо лишь для совершенных по степени вскрытия скважин при незначительных потерях напора на прохождение жидкости через приемную поверхность. Это ограничение резко сужает область применения метода расходомерии для определения фильтрационной неоднородности разреза, так как большинство пробуренных скважин гидродинамически несовершенны и в случае необсаженных скважин пренебрежение потерями напора

внутри ствола может быть недопустимо вследствие достаточно больших значений коэффициента сопротивления трению.

Результаты исследований, приведенные в предыдущих главах, и натурные измерения скорости потока внутри ствола водозаборных скважин, выполненные рядом исследователей [13, 17, 29], показали, что даже в условиях практически однородного слоя приток воды в фильтр может происходить преимущественно через его верхнюю часть. При этом зависимость дебита от длины фильтра имеет явно выраженный экспоненциальный характер, который не может быть объяснен фильтрационной неоднородностью разреза или кольматажем призабойной зоны.

На рис. VII. 1 приведены графики изменения скорости потока и диаграммы изменения бокового притока вдоль приемной части двух водозаборных скважин. Очевидно, что основная масса воды поступает в верхнюю часть фильтра, хотя по данным гранулометрического состава отобранных проб пласты в разрезе практически однородны. Если эти данные обработать согласно существующим приемам интерпретации результатов расходомерии, то в итоге получим нарастающее увеличение проницаемости пласта вверх по разрезу. В действительности проницаемость опробованных интервалов постоянна, а по скв. 6 (Горьковский стационар ВНИИВОДГЕО) она даже несколько выше в нижней части разреза.

Приведенные факты свидетельствуют о необходимости внимательного подхода к вопросу динамики потока в призабойной зоне и внутри ствола скважины, т.е. при интерпретации расходограмм нужно учитывать не только особенности движения жидкости в пласте, но и закономерности ее истечения из пласта в скважину. Вопросам влияния гидравлического сопротивления скважины на приток воды и определению рациональной области применения расходомерии посвящены работы В.С. Алексеева, А.Д. Курманенко, В.Ф. Суханова, И.И. Гринбаума и др. В 1981 г. опубликована монография И.М. Гершановича, в которой рассматривается теория, методика и техника расходомерии совершенных по степени вскрытия скважин. Предложенная им методика интерпретации основывается на допущении о плоско-радиальном характере движения потока в скважину и использовании в качестве расчетных зависимостей модифицированных формул Ж.Дюпюи и Ч.Тэйса. Влияние гидравлического сопротивления скважины учитывается введением в величины напора поправок на дополнительные потери, вызванные отклонением от линейного закона фильтрации, прохождением воды через боковую поверхность фильтра и внутри него. Правомерность введения поправок нуждается в доказательстве, а расчетные формулы для потерь напора требуются апробировать на моделях или в натурных условиях.

Необходимость дальнейшего усовершенствования имеющихся [13, 17, 29] и разработки новых способов интерпретации расходограмм обусловливается широким внедрением метода расходомерии в практику гидрогеологических, инженерно-геологических и гидротехнических изыс-

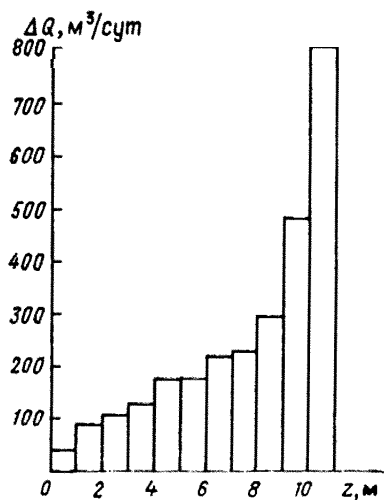
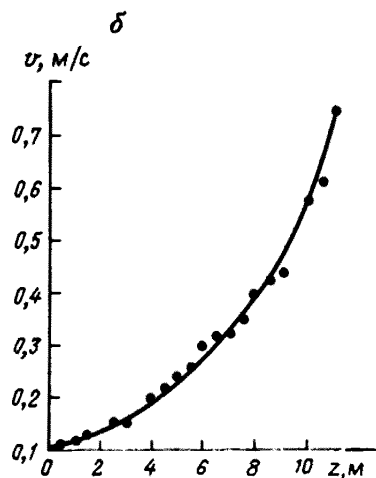
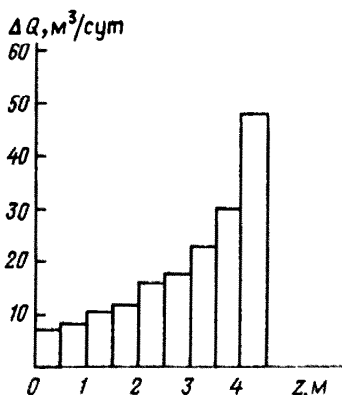
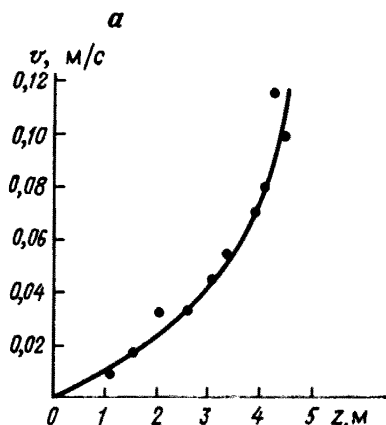


Рис. VII. 1. График изменения средней скорости потока и диаграмма изменения бокового притока по длине фильтра в однородном пласте:

a — скв. 6, Горьковский стационар ВНИИВООДГЕО, $Q = 181 \text{ м}^3/\text{сут}$, $S = 0,9 \text{ м}$; $D = 0,156 \text{ м}$; $r_r = 0,16 \text{ м}$; $L = 4,5 \text{ м}$, $k = 35 \text{ м/сут}$; **б** — скв. 15, водозабор Балтазерс; $Q = 3240 \text{ м}^3/\text{сут}$; $S = 3,97 \text{ м}$; $D = 0,254 \text{ м}$, $r_r = 0,4 \text{ м}$; $L = 11,0 \text{ м}$; $k = 50 \text{ м/сут}$

каний. Следует отметить, что только в Министерстве геологии СССР число опытных откачек достигает около 4 тыс. в год с общей продолжительностью более 50 тыс. бригадо-смен. Очевидно, что проведение расходометрического каротажа в процессе опытной откачки может существенно повысить информативность опытно-фильтрационных работ.

§ 2. ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН РАВНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ ТОЛЩЕ

Определение степени и характера неоднородности разреза сводится к выделению зон (слоев) равной проводимости и нахождению коэффициента фильтрации пород в выделенных зонах.

Решение первой из указанных задач осуществимо при использовании принципа однородности, который можно сформулировать следующим образом. Если в неоднородной системе, состоящей из группы контактирующих между собой кусочно-однородных областей, создается возмущение, то распространение этого возмущения внутри каждой области происходит по закону, справедливому для однородных тел:

$$I = cf(1/R), \quad (\text{VII } 1)$$

где c — переменная для системы и параметр внутри любой из областей; R — сопротивление тела вызванному возмущению.

Из принципа однородности следует, что на поверхностях раздела разнородных областей кривые распределения величин, характеризующих эффект возмущения, должны иметь изломы или разрывы. Определение координат последних адекватно определению границ раздела сред, обладающих различными проводимостями.

Для четкой фиксации изломов или разрывов вначале следует установить граничные условия на поверхности раздела неоднородная система — окружающая среда, а затем, условно принимая реальную систему за однородную, подобрать соответствующую граничным условиям формулу и преобразовать ее таким образом, чтобы она описывала уравнение прямой в выбранной системе координат. Построенная по преобразованной формуле графическая зависимость между величинами, эквивалентными эффекту возмущения и сопротивлению среды, изобразится отрезками прямых с разными угловыми коэффициентами. О наличии изломов или разрывов можно также судить по изменению значения производной указанных выше переменных.

Приведенный способ разграничения неоднородностей — достаточно общий и не зависит от характера распределения неоднородностей, вида возмущения и физических свойств среды, в которой оно распространяется. В частности, использование принципа однородности и вытекающих из него следствий позволяет решить задачу о выделении зон фильтрационной неоднородности на основании данных гидрокаротажа скважин.

Предположим, что скважиной вскрыт кусочно-неоднородный пласт с несущественной разностью напоров по разрезу и во время откачки измерены скорости (расходы) в приемной части скважины.

Согласно предлагаемой методике условимся считать пласт однородным. В этом случае для любого сечения приемной части скважины в зависимости от типа распределения расхода справедливы выражения

$$\bar{Q} = \bar{v} = \operatorname{tg} \gamma \bar{z} / \operatorname{tg} \gamma \quad (\text{VII. 2})$$

или

$$\bar{Q} = \bar{v} = \operatorname{sh} \alpha \bar{z} / \operatorname{sh} \alpha. \quad (\text{VII. 3})$$

В качестве величин, эквивалентных эффекту возмущения и сопротивлению среды, могут быть приняты соответственно $\bar{Q}(\bar{v})$ и \bar{z} (вместо относительных величин \bar{Q} и \bar{z} можно применять абсолютные величины Q_z и z). Следовательно, для дальнейшего разделения неоднородного пласта на зоны приблизительно равной проводимости зависимость (VII. 2) или (VII. 3) необходимо представить в виде уравнения прямой

$$f(\bar{Q}) = a + b \varphi(\bar{z}). \quad (\text{VII. 4})$$

При малых значениях аргумента $\operatorname{tg} \gamma \bar{z} \rightarrow \gamma \bar{z}$, $\operatorname{sh} \alpha \bar{z} \rightarrow f \bar{z}$ и зависимость (VII. 2) или (VII. 3) принимает вид

$$\bar{Q} = \bar{z} \quad \text{или} \quad \bar{Q}_z = \alpha z, \quad (\text{VII. 5})$$

где $\alpha = Q_L / L$.

Выражение (VII. 5) означает, что в случае малой интенсивности отбора воды из скважины и невысокой проницаемости пород сглаженный график каротажа $Q_z = f(z)$ или $v_z = f(z)$ без каких-либо преобразований представляет собой ломаную и выделение зон равной проводимости не вызывает особых затруднений. Абсциссы начала и конца каждой прямой соответствуют отметкам залегания зон приблизительно равной проводимости, а проекция прямой на ось ординат — ее мощности.

При больших значениях аргумента $\gamma \bar{z}$ и $\alpha \bar{z}$ зависимость $Q_z = f(z)$, полученная в результате расходометрического каротажа, изображается кривой (рис. VII. 2, а), которая имеет точки перегиба на границе резкой смены проницаемости пластов. Выделение зон равной проводимости внутри интервала, ограниченного резкой сменой проницаемости, затруднительно, так как даже плавная (усредненная) кривая может соответствовать зоне, в которой проводимость непрерывной меняется по какому-либо закону. Качественная диагностика "внутренней однородности" зон, выделенных на основании вида кривой $Q_z = f(z)$, возможна при преобразовании исходных зависимостей (VII. 2) и (VII. 3).

При условии $\gamma \bar{z} \leq 1$ зависимость (VII. 2) можно разложить в степенной ряд:

$$\bar{Q}_z \approx a_1 \bar{z} + a_3 \bar{z}^3 + a_5 \bar{z}^5.$$

В связи с определенными трудностями представления приведенного выражения в виде уравнения прямой разделим его на \bar{z} :

$$\bar{Q}_z / \bar{z} \approx a_1 + a_3 \bar{z}^2 + a_5 \bar{z}^4.$$

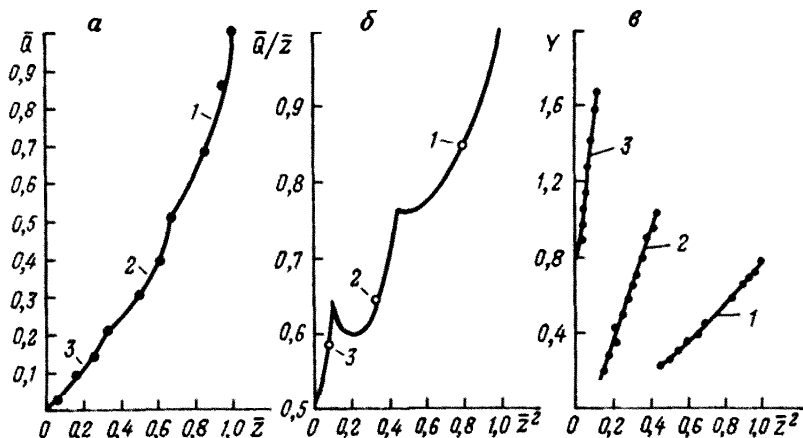


Рис. VII. 2. График выделения однородных зон ($\bar{m} = 1,0$; $\psi \rightarrow \infty$):

$a - \bar{Q} = f(z)$; $б - \bar{Q}/\bar{z} = f(\bar{z})$; $в - Y = f(\bar{z})$; 1 - $k = 30$ м/сут; 2 - $k = 100$ м/сут; 3 - $k = 300$ м/сут; кружки - фиксированные точки; черные кружки - экспериментальные точки

Последнее можно представить в виде уравнения прямой в координатах X и Y , если принять

$$X = \bar{z}^2 \quad \text{и} \quad Y = \frac{(\bar{Q}/\bar{z}) - (\bar{Q}/\bar{z})_1}{\bar{z}^2 - \bar{z}_1^2}, \quad (VII. 6)$$

где \bar{z}^2 и \bar{Q}/\bar{z} - текущие координаты; \bar{z}_1^2 и $(\bar{Q}/\bar{z})_1$ - соответственно абсцисса и ордината фиксированной точки, выбранной на графике $\bar{Q}/\bar{z} = f(\bar{z})$.

Исходя из этого для диагностики "внутренней однородности" зон, выделенных непосредственно на каротажной кривой $Q = f(z)$, рекомендуется построить преобразованный график расходомеррии в координатах \bar{Q}/\bar{z} и \bar{z}^2 и выбрать в интервале каждой из зон фиксированную точку (рис. VII. 2, б). В случае однородности выделенных зон построенная зависимость

$$\frac{(\bar{Q}/\bar{z}) - (\bar{Q}/\bar{z})_1}{\bar{z}^2 - \bar{z}_1^2} = f(\bar{z})^2 \quad (VII. 7)$$

изобразится отрезками прямых (рис. VII. 2, в). Как и в предыдущем случае, абсциссы начала и конца каждой из выравниваемых кривых $Q_z = f(z)$ соответствуют отметкам залегания подошвы и кровли зоны равной проводимости. Если в каком-либо интервале зависимость (VII. 7) явно нелинейна, то это означает, что коэффициент фильтрации пород в

пределах данного интервала является величиной переменной по разрезу. Опыт диагностики "внутренней однородности" выделенных зон показывает, что для совершенных по степени вскрытия скважин фиксированную точку лучше всего выбирать в средней части зоны. Для несовершенных скважин, примыкающих к подошве горизонта, фиксированную точку целесообразно выбирать в начале зоны, для скважин, примыкающих к кровле горизонта, — в конце зоны. При этом отсчет начала зон ведется от забойной части фильтра (скважины).

Зависимость (VII.3) можно представить в виде

$$\bar{Q} = \frac{e^{a(\bar{z}-1)} (1 - e^{-2a\bar{z}})}{1 - e^{-2a}}.$$

Если величина аргумента a достаточно большая, то начиная с некоторого значения \bar{z} последнее выражение после логарифмирования запишется так:

$$\ln \bar{Q} \approx a\bar{z} - a. \quad (\text{V.I. 8})$$

Следовательно, график каротажа в координатах $\ln \bar{Q}$ и \bar{z} будет представлен ломаной. Методика выделения зон "равной" проводимости в этом случае аналогична ранее изложенной.

Очевидно, что само по себе выделение зон "равной" проводимости в разрезе не позволяет однозначно охарактеризовать фильтрационные свойства породы. Для этого необходимо знать величину проводимости пласта в пределах каждой зоны.

В связи с тем, что разграничение неоднородностей в плане представляет не меньший интерес, покажем на двух примерах ход решения этой сходной по физическому смыслу задачи.

Если граничные условия позволяют считать пласт полуограниченным, то, условно приняв его за однородный, в качестве исходной формулы выберем известную формулу Ф. Форхгеймера

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{\rho}{r}.$$

Аналогично для напорного неограниченного неоднородного пласта при квазистационарном движении примем

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25\sigma t}{r^2}.$$

Величины, эквивалентные эффекту возмущения и гидравлическому сопротивлению среды, равны: для первого случая — S и $\ln(\rho/r)$, для второго — S и $\ln r$. Во втором случае понижение уровня воды в отдель-

ных точках пласта берется в один и тот же момент времени, соответствующий квазистационарному режиму движения. Преобразованные формулы имеют вид

$$S = B \ln(\rho/r) \text{ и } S = A - B \ln r,$$

где $B = Q/(2\pi km)$; $A = Q \ln 2,25 at/(4\pi km)$.

При достаточном количестве наблюдательных скважин по графикам, построенным в координатах $S, \ln(\rho/r)$ и $S = \ln r$, нетрудно определить границы разделов зон с различными фильтрационными свойствами.

Эксперименты, выполненные автором на бумажных моделях ЭГДА, и расчеты по формулам неустановившегося движения для случая кольцевой неоднородности показали высокую точность предлагаемого метода разделения неоднородного в плане пласта на отдельные однородные зоны. На рис. 7 приложения приведена схема модели кусочно-неоднородного пласта, а на рис. 8 — соответствующая зависимость $S = f[\ln(\rho/r)]$. При упорядоченной неоднородности (полосовой, кольцевой и т.п.) и расположении створа наблюдательных скважин по нормали к границам неоднородности отношение угловых коэффициентов прямых обратно пропорционально отношению соответствующих проводимостей пород кусочно-однородных зон. Водопроницаемость отдельных однородных зон рассчитывалась исходя из соотношения $km = Q/(2\pi B)$. В случае хаотичного распределения неоднородности расчетные значения km могут отличаться от фактических вследствие неопределенности исходного значения расхода, используемого для вычисления проводимости. Однако границы отдельных однородных зон фиксируются достаточно точно (рис. 8 приложения).

Применение принципа однородности особенно перспективно при проведении геологоразведочных работ на месторождениях подземных вод в речных долинах. Начавшееся в последнее время внедрение дистанционных и наземных радиофизических методов определения уровня грунтовых вод с помощью регистрации собственного СВЧ-излучения пород в сантиметровом и дециметровом диапазонах позволит исключить бурение большого числа наблюдательных скважин и тем самым существенно снизить затраты на получение необходимой информации о степени плановой неоднородности исследуемого пласта.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПОРОД

Возможности послойного определения коэффициента фильтрации (проницаемости) пород неоднородной толщи по данным расходомерии и способы обработки расходограмм зависят в первую очередь от степени деформации потока в околоскважинном пространстве и внутри самой скважины. В гл. IV и VI показано, что, несмотря на многообразие

причин, деформацию реального потока достаточно полно можно охарактеризовать интенсивностью притока dQ/dz , коэффициентом фильтрации пород призабойной зоны k_n или коэффициентом сопротивления вследствие деформаций в призабойной зоне $(\xi_n + \xi_\phi)$, потерями напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра $\Delta h \psi_z$ и протяженностью зоны существенной деформации $r = \epsilon m$. Учитывая изложенное выше и принимая во внимание, что в основу метода интерпретации расходограмм положен принцип соответствия между коэффициентом фильтрации и интенсивностью притока при действующем понижении уровня, уравнение притока жидкости в скважину следует записать в виде:

$$f\left(\frac{dQ}{dz}, S_z, k_z, \bar{k}m, (\xi_n + \xi_\phi)_z, \Delta h \psi_z, \epsilon m, t\right) = 0.$$

Данное уравнение полностью определяет процесс истечения жидкости из породы в скважину при сохранении закона Дарси вплоть до ее приемной части.

Согласно выполненным исследованиям (см. § 3 гл. II и § 1 гл. IV) связь между приведенными параметрами и функциями при квазистационарном режиме может быть представлена в общем виде следующими выражениями:

для однонапорной толщи, состоящей из n гидравлически связанных пластов,

$$S'_z = \frac{1}{2\pi k_z} \left[\ln \frac{\bar{\epsilon}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_z \right] \frac{dQ}{dz} + \frac{Q}{2\pi k m} R^{**} + \\ + \frac{1}{2g (\pi D \psi_z)^2} \left(\frac{dQ}{dz} \right)^2; \quad (\text{VII. 9})$$

для разлонапорной толщи с пластами, разделенными глинистыми перемычками,

$$S''_z = \frac{1}{2\pi k_z^*} \left[\ln \frac{\bar{\epsilon}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_z \right] \frac{dQ}{dz} + \frac{Q^*}{2\pi k_z^* \Delta m} R^{**} + \\ + \frac{1}{2g (\pi D \psi_z)^2} \left(\frac{dQ}{dz} \right)^2, \quad (\text{VII. 10})$$

где Q^* — расход из пласта, ограниченного глинистыми перемычками; k_z^* — усредненный коэффициент фильтрации пласта; Δm — мощность пласта; m — мощность опробуемой толщи.

Формулы (VII. 9) и (VII. 10) справедливы как для совершенной, так и для несовершенной скважины и учитывают гидравлическое сопро-

тивление скважины, фильтрационные свойства смежных слоев и граничные условия в плане. Принципиальная возможность расчета коэффициента фильтрации по (VII. 9) и (VII. 10) проверялась путем сравнения расчетных и заданных на электрической модели (фактических) величин коэффициентов фильтрации отдельных слоев. При обработке экспериментального материала во всех без исключения опытах отбрасывались данные, относящиеся к верхнему и нижнему сечениям электрической модели. Результаты сравнения приведены ниже.

Отклонение расчетных значений k_z от фактических, %	0 — 2,5	2,5 — 5,0	5,0 — 7,5	7,5 — 10,0	> 10
Число наблюдений m	88	55	36	24	34
Частота m/n	0,371	0,232	0,152	0,101	0,144

Из приведенных данных следует, что уравнения (VII. 9) и (VII. 10) могут использоваться в практических расчетах коэффициента фильтрации (проницаемости) пород. В результате аналогичности этих уравнений способы расчета коэффициентов фильтрации однонапорной и разлонапорной толщ после определения действующих понижений также аналогичны.

Методика проведения наблюдений в натуральных условиях различна при малых и существенных потерях напора внутри приемной части скважины. Если при малых потерях напора достаточно выполнить обычный замер уровня воды (напора) и расходомерию, то при существенных потерях напора нужно измерить также напор (давление) по длине приемной части. Необходимым признаком наличия ощутимых потерь является криволинейность зависимости $\bar{v} = f(\bar{z})$ или $\bar{Q} = f(\bar{z})$.

Ввиду некоторого различия в составе наблюдений и способах обработки приведем формулу (VII. 9) к виду, удобному для использования, отдельно для случаев квазиравномерного и неравномерного притоков.

Для случая квазиравномерного притока производная расхода по ординате равна интенсивности притока в пределах однородного слоя. Заменяя в (VII. 9) производную расхода интенсивностью притока $\Delta Q/\Delta m$, используя зависимость (VI. 10) и проведя алгебраические преобразования, окончательно получим для любого сечения приемной части

$$S'_z = \frac{1}{2\pi k_z} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_z + \frac{\bar{k}_L L}{km} R^{**} \right] \left(\frac{\Delta Q}{\Delta m} \right)_z + \frac{1}{2g(\pi D \psi_z)^2} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta m} \right)_z^2. \quad (\text{VII. 11})$$

Соответственно с некоторым приближением для скважины в целом действующее понижение уровня воды в обсадной колонне

$$S'_c = \frac{Q}{2\pi k_L L} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_c + \frac{k_L L}{km} R^{**} \right] + \frac{1}{2g(\pi D \psi_c)^2} \left(\frac{Q}{L} \right)^2; \quad (\text{VII. 12})$$

$$\bar{S}'_c = (S_c - \Delta h_\tau),$$

где $\bar{\xi}_n$ и $\bar{\xi}_\phi$ — соответственно усредненные в интервале приемной части коэффициенты дополнительного сопротивления, обусловленные нарушением призабойной зоны и прерывистостью поступления жидкости через боковую поверхность приемной части; $(\Delta Q/\Delta m)_z$ — интенсивность притока в пределах однородной зоны; \bar{k}_L — среднеинтегральное значение коэффициента фильтрации пород в пределах вскрытой части пласта.

Из выражений (VI. 10) и (VII. 11), (VII. 12) при $\Delta h_\psi \rightarrow 0$ и равенстве $(\xi_n + \xi_\phi) = (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)$ получим

$$k_z = \frac{k_L L}{a} \left(\frac{\Delta a}{\Delta m} \right)_z \quad (\text{VII. 13})$$

и

$$k_z = \frac{k_L L}{a} \frac{s'_c}{s'_z} \left(\frac{\Delta a}{\Delta m} \right)_z. \quad (\text{VII. 14})$$

Отсюда при $\Delta h_\tau = 0$ следует частное решение для совершенной скважины в однонапорной и разлонапорной толщах, приводимое в работе [13]:

$$k_z = \frac{\bar{k}m}{a} \left(\frac{\Delta a}{\Delta m} \right)_z \quad (\text{VII. 15})$$

и

$$k_z = \frac{\bar{k}m}{a} \frac{s_c}{s_z} \left(\frac{\Delta a}{\Delta m} \right)_z. \quad (\text{VII. 16})$$

Используя результаты, полученные в предыдущих главах, можно показать также справедливость следующего выражения:

$$Q_z = \frac{\int_0^z k_z dz}{k_L L}, \quad (\text{VII. 17})$$

где $\bar{Q}_z = Q_z/Q_L$ — относительный расход в произвольном сечении приемной части; $\int_0^z k_z dz$ — суммарная водопроводимость неоднородной толщи от забоя до сечения z .

Согласно (VII. 17) относительный расход в сечении z прямо пропорционален отношению проводимости интервала забой — сечение z к суммарной проводимости всей вскрытой части неоднородной толщи.

Относительное вскрытие пласта m	Коэффициент фильтрации k_z , м/сут		Относительное вскрытие пласта m	Коэффициент фильтрации k_z , м/сут	
	модель	расчет		модель	расчет
0,83*	30	42	0,50**	30	72
	100	145		100	218
	300	487		300	774
0,67*	30	87	0,17**	100	860
	100	343			
0,50*			0,83***	30	35
	30	143		100	104
	100	574		300	307
0,33*	30	430	0,67***	100	111
				300	317
0,17*	30	860	0,50***		
				100	136
0,67**	30	49		300	362
	100	152			
	300	506	0,33***	300	430
0,33**				300	856
	100	430			

Примечание. Фильтр расположен: * у кровли, ** в середине, *** у подошвы пласта.

Как показали эксперименты на электрической модели системы пласт—скважина, использование формул (VII. 15) и (VII. 16) для несовершенных скважин приводит к существенным ошибкам. Данные модельных и расчетных значений коэффициента фильтрации пород при равномерном притоке приведены в табл. VII. 1.

Еще большие ошибки отмечаются при использовании формул (VII. 15) и (VII. 16) в случае неравномерного притока. Совпадение истинного (модельного) и расчетного значений коэффициента фильтрации наблюдается только в нейтральной точке. Причем в квазиоднородном однонапорном пласте расчетные значения k_z , вычисленные по (VII. 15), в забойной части скважины всегда меньше, а в устьевой — всегда больше истинных. В неоднородной однонапорной толще расчетные значения k_z могут быть больше и меньше истинных. При этом сумма расчетных проводимостей $\sum_{L=1}^n (km)$, практически всегда равна сумме истинной суммарной проводимости km . Таким образом, в этих случаях равенство суммы

расчетных проводимостей истинной суммарной проводимости, получаемой по наблюдательной или опытной скважине, не является критерием достоверности вычисленных значений коэффициентов фильтрации пород.

Формальное введение соответствующих поправок, обусловленных трением, в понижение уровня воды [13] при использовании зависимости (VII. 16) в случае неравномерного притока приводит к увеличению получаемых значений k_z по сравнению с истинными. В качестве иллюстрации в табл. VII. 2 приведены величины коэффициента $n = k_m/k_p$, где k_m и k_p — соответственно значения коэффициентов фильтрации пород, заданных на модели (истинных) и рассчитанных по зависимостям (VII. 15) и (VII. 16).

В опыте № 33 моделировался отбор воды из совершенной по степени вскрытия скважины, пробуренной в однородной однонапорной толще; в опыте № 42 — отбор воды из совершенной по степени вскрытия скважины, пробуренной в неоднородной напорной толще, которая представлена тремя гидравлически связанными пластами различной проницаемости. Обе скважины обладали значительным гидравлическим сопротивлением, т.е. приток имел неравномерный характер. Значения дебита скважин задавались, значения понижения уровня воды S'_z в приемной части скважины и величины Q_z снимались с модели. Производная dQ/dz рассчитывалась по зависимости, аналогичной (III. 60). Расчет коэффициента фильтрации пород по зависимости (VII. 15) предполагал пренебрежение потерями напора, обусловленными гидравлическим сопротивлением скважины. Расчет по зависимости (VII. 16) проводился исходя из величин S'_z и S'_c , полученных на модели, т.е. считалось, что поправки на потери напора вследствие гидравлического сопротивления скважины введены правильно. Согласно зависимостям (IV. 34) и (IV. 33) для опытов № 32 и 42 нейтральная точка находилась соответственно в сечениях $z_n \approx 31,0$ м и $z_n \approx 29,5$ м.

Формулы (VII. 11) — (VII. 14) являются исходными для расчета коэффициента фильтрации пород k_z в неоднородной толще при квазиравномерном притоке в совершенные и несовершенные по степени вскрытия скважины. В случае совершенных скважин $\bar{k}_L L = \bar{k}m$.

Если нарушения в призабойной зоне скважины малы $[(\xi_n + \xi_\phi) \approx 0]$, $(\xi_n + \xi_\phi) \ll (\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + \frac{k_L L}{km} A^{**})$ или значительны, но степень нарушения призабойной зоны одинакова по длине приемной части скважины $[|\xi_n + \xi_\phi| > 0 \text{ и } (\xi_n + \xi_\phi) \approx (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)]$, то для совершенных по степени вскрытия скважин абсолютные значения k_z могут рассчитываться графоаналитическим способом по формулам (VII. 11), (VII. 12) при проведении расходомерии и откачек с тремя понижениями уровня. Для несовершенных скважин определяются относительные значения k_z .

Определение абсолютного значения k_z по данным расходомерии и откачки с одной ступенью понижения возможно лишь при незначитель-

Значения коэффициента $n = k_m/k_p$

Но- мер опы- та	Расчет	Расстояния от подошвы z , м												
		5	10	15	19	20	25	30	35	39	45	50	55	59
33	Без учета трения (VII. 15)	4,12	3,98	3,61	—	2,88	1,99	1,14	0,49	0,14	—	—	—	—
	С поправкой на трение (VII. 16)	0,68	0,66	0,63	—	0,54	0,43	0,31	0,20	0,11	—	—	—	—
42	Без учета трения (VII. 15)	3,91	3,68	2,94	2,04	—	1,39	0,96	0,60	0,36	0,24	0,14	0,11	0,07
	С поправкой на трения (VII. 16)	0,33	0,31	0,27	0,20	—	0,17	0,14	0,11	0,09	0,09	0,07	0,07	0,06

ных потерях напора на прохождение жидкости через боковую поверхность фильтра (каркасно-стержневые фильтры с гравийной обсыпкой) и совершенстве скважины по степени вскрытия пласта. Исходными являются формулы (VII. 11) — (VII. 14). Для несовершенных скважин находится только относительное значение коэффициента фильтрации по разрезу. Это объясняется тем, что на основе данных откачки из опытной скважины получают среднеинтегральную величину проводимости $\bar{k}m$, а значение $\bar{k}_L L$ неопределенно. При наличии наблюдательной скважины и $(\xi_n + \xi_\phi) \rightarrow 0$ величина $\bar{k}_L L$ определяется аналитическим путем:

$$\bar{k}_L L = \frac{\bar{k}m \ln(\bar{e}m/r_0)}{(2\pi\bar{k}mA/Q) - \ln(1,5\sqrt{at/r_0}) + \ln \bar{e}m/r_0}, \quad (\text{VII. 18})$$

где A — длина отрезка, отсекаемого прямой $S = f(\ln t)$ на оси ординат.

При этом абсолютные значения k_z для несовершенных по степени вскрытия скважин могут рассчитываться по зависимостям (VII. 13) и (VII. 14).

Если нарушения в призабойной зоне значительны и степень нарушения по длине приемной части скважины неодинакова

$$[|\xi_n + \xi_\phi| > 0 \text{ и } (\xi_n + \xi_\phi) \neq (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)],$$

то определить абсолютные значения k_z по разрезу невозможно. Приближенные значения относительной проводимости пород можно найти, используя зависимости (VII. 12) — (VII. 14).

В случае неравномерного притока исходными для расчета коэффициента фильтрации (проводимости) пород являются зависимости (VII. 9) и (VII. 10). Необходимо отметить, что при существенном сопротивлении движению жидкости через боковую поверхность приемной части скважины расчеты затруднены. Однако этот вариант фильтрации чрезвычайно редок, так как при значительных величинах Δh_ψ приток в подавляющем большинстве случаев будет равномерным и лишь для скважин с исключительно интенсивным отбором возможно сочетание больших абсолютных значений Δh_ψ и неравномерного притока. Следовательно,

в случае неравномерного притока величиной $\frac{1}{2g(\pi D \psi)^2} \frac{dQ}{dz}$ в уравнениях (VII. 9) и (VII. 10) можно пренебречь.

Интегрируя уравнения (VII. 9) и (VII. 10), получим зависимость среднеинтегрального понижения уровня воды от интенсивности притока в интервале квазиоднородной зоны и пласте, ограниченном "непроницаемыми" глинистыми перемычками:

$$\bar{S} = \frac{1}{2\pi k_z} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi) \right] \frac{\Delta Q}{\Delta m} + \frac{a}{2\pi \bar{k}m} R^{**} \quad (\text{VII. 19})$$

и

$$\bar{S}^* = \frac{1}{2\pi k_z^*} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi) \right] \left(\frac{\Delta Q}{\Delta m} \right)^* + \frac{a^*}{2\pi \bar{k}_z^* \Delta m} R^{**}, \quad (\text{VII. 20})$$

где \bar{S} и \bar{S}^* — соответственно среднеинтегральные понижения в интервале квазиоднородной зоны и пласте, ограниченном глинистыми перемычками; $\Delta Q/\Delta m$ и $(\Delta Q/\Delta m)^*$ — соответственно средние интенсивности притока в пределах квазиоднородной зоны и пласта.

Расчет абсолютных значений коэффициента фильтрации пород k_z возможен на основании данных замера давления и скорости (расхода) по длине приемной части совершенных и несовершенных скважин при откачке с тремя понижениями уровня, если $(\xi_n + \xi_\phi) \approx 0$ или $\ln(\bar{e}m/r_0) \gg \gg (\xi_n + \xi_\phi)$. При $|\xi_n + \xi_\phi| > 0$, но $(\xi_n + \xi_\phi) \approx (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)$ в совершенных скважинах определяются абсолютные, а в несовершенных скважинах относительные значения k_z . По данным расходомерии и откачки с одним понижением уровня определение k_z возможно при наличии наблюдательной скважины, так как точное значение R^{**} неизвестно и появляется необходимость его замены в формулах (VII. 9), (VII. 10), (VII. 19) и (VII. 20) на выражение, содержащее величину понижения уровня в наблюдательной скважине.

Если $|\xi_n + \xi_\phi| > 0$ и $(\xi_n + \xi_\phi) \neq (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)$, то, так же как и в случае квазиравномерного притока, можно определить лишь относительную проводимость пород по разрезу.

Одна из отличительных особенностей неравномерного притока — наличие градиента давления внутри приемной части скважины и, как следствие этого, наличие градиента скоростей. Поэтому, вводя поправки в действующие понижения и оставляя неизменными величины интенсивности притока, нельзя увеличить точность расчета коэффициента фильтрации пород. Перевод реального потока в условно двухмерный может быть осуществлен одновременным исправлением величин понижения уровня S_z и интенсивности притока dQ/dz .

В общем случае характер зависимости $Q = f(z)$ обуславливают три фактора.

1. Наличие градиента давления внутри приемной части скважины вследствие потерь напора на преодоление сил инерции и турбулентного трения.

2. Искажение истинного поля скоростей из-за влияния расходомера как тела, помещенного в поток. При этом чем ближе расходомер расположен к выходному сечению фильтра, тем больше абсолютная величина дополнительных возмущений потока при обтекании расходомера.

3. Несоответствие условий тарировки и работы расходомера, так как расходомер тарируется в сплошных трубах, а работает в перфорированных (тарировочная корреляционная кривая должна строиться на основании соотношения между $v_z = v_L \sqrt{S}$ и количеством оборотов крыльчатки).

Выявление относительной доли каждого из указанных факторов при разной интенсивности притока возможно после проведения специальных гидравлических исследований системы расходомер — скважина. Можно считать, что в настоящее время расчет коэффициента фильтрации пород многослойной толщи основан на обработке кажущихся профилей. Поэтому одна из задач усовершенствования методики интерпретации расходомерии — определение степени соответствия кажущихся профилей истинным. До проведения специальных исследований расходомерию желательно проводить при таких расходах, когда зависимость $Q = f(z)$ представляет собой ломаную. Это позволит устранить или уменьшить возможную погрешность, обусловленную указанными выше факторами.

Несмотря на ряд нерешенных вопросов интерпретации, метод расходомерии все же эффективен при получении количественной информации по разрезу. Преимущество этого метода в том, что он не нуждается в предварительном выборе гипотезы о строении неоднородной толщи.

§ 4. ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПЬЕЗОРАСХОДОМЕТРИИ СКВАЖИН

При определении фильтрационных свойств неоднородной в разрезе толщи состав и объем буровых, опытно-фильтрационных и гидрокаротажных работ на разведываемой площади зависит от стадийности изысканий, глубины залегания опробуемой толщи и значимости объекта.

На участках детальной разведки крупного объекта (месторождения) желательно бурение наблюдательных скважин для определения таких гидродинамических параметров, как общая водопроницаемость km , пьезопроводность a , коэффициент сопротивления $(\xi_n + \xi_\phi)$, обусловленный нарушением призабойной зоны и прерывистостью поступления жидкости через боковую поверхность приемной части. Общее число опытных и наблюдательных скважин выбирается в каждом конкретном случае в зависимости от размеров разведываемой площади и необходимости детального изучения неоднородности разреза. Опытные откачки проводятся не менее чем при трех ступенях понижения. Расходомерию следует проводить в конце каждой ступени понижения при квазистационарном режиме. При этом за период проведения измерений понижение уровня в скважине при постоянном дебите может изменяться не более чем на 2 — 5 %.

На участках предварительной разведки фильтрационную неоднородность разреза для однонапорной толщи можно определить, ограничиваясь одной ступенью понижения. В случае разнонапорной толщи необходимо иметь как минимум две ступени понижения для нахождения действующих понижений уровня воды через соответствующие статические уровни отдельных слоев (пластов, горизонтов).

Гидрокаротажные работы следует проводить по возможности в совершенной по степени вскрытия скважине, что существенно облегчает интерпретацию опытных данных и повышает ее информативность.

Скважина может считаться совершенной по степени вскрытия пласта, начиная с относительного вскрытия $\bar{m} \geq 0,9$, при мощности непроницаемых и слабопроницаемых пород (глины, суглинки и др.) в подошве пласта $m \geq 1 \div 2$ м и их выдержанности на расстоянии не менее половины мощности пласта.

После бурения опытной скважины, ее прокачки и восстановления уровня воды проводится расходомерия при статическом режиме, время установления которого принимается в соответствии с рекомендациями А.А. Плетнева и И.М. Гершановича. Фиксация перетекания внутри приемной части скважины свидетельствует о разности напоров в пределах опробуемой толщи, отсутствие — о равенстве их. Вид зависимости $Q_z = f(z)$ для различных соотношений напоров показан на рис. VII. 3.

В процессе опытных откачек и расходомерии строятся зависимости $Q_z = f(z)$ и $S'_c = f(Q)$ с целью проверки правильности проведения откачки и решения вопроса о необходимости дополнительной ступени понижения. В опытной скважине расходомерия проводится дважды по схемам сверху — вниз и снизу — вверх. После первой серии определяется шаг

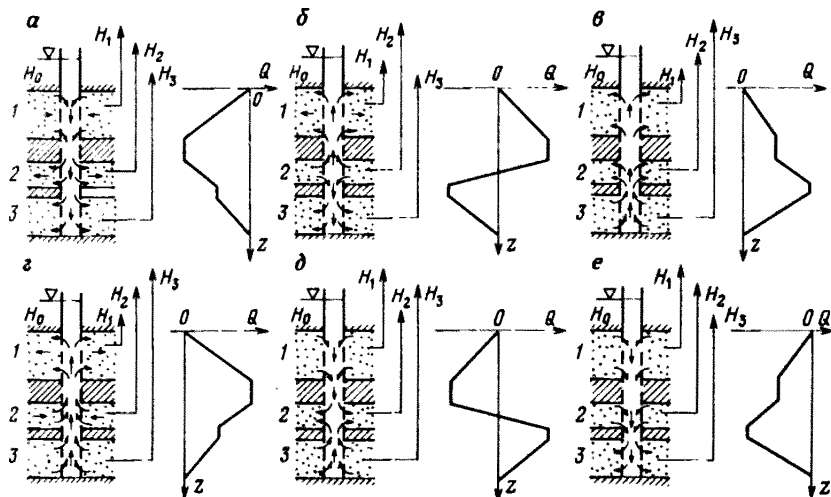


Рис. VII. 3. Схема притока при статическом режиме:

1, 2, 3 — водопроницаемые пласты; H_0 — объединенный статический уровень; H_1, H_2, H_3 — статические уровни каждого пласта; а — $H_1 > H_0$; $H_2 < H_0$; $H_3 < H_0$; б — $H_1 < H_0$; $H_2 > H_0$; $H_3 < H_0$; в — $H_1 < H_0$; $H_2 < H_0$; $H_3 < H_0$; г — $H_1 < H_0$; $H_2 < H_0$; $H_3 > H_0$; е — $H_1 > H_0$; $H_2 > H_0$; $H_3 > H_0$.

опробования, который зависит от изменчивости фильтрационных свойств по разрезу.

На основании анализа графиков $Q = f(z)$ и $S'_c = f(Q)$:

устанавливается качественное соотношение напоров отдельных водоносных слоев (пластов);

выделяются водоносные и слабопроницаемые слои и строится схематический фильтрационный разрез;

делается заключение об однородности слоев в пределах выделенных зон и о влиянии потерь напора в приемной части скважины на приток воды к ней.

Выделение водоносных и слабопроницаемых зон затруднений не вызывает, так как в интервале слабопроницаемых пород расход по разрезу постоянен, а в интервале водоносных слоев отмечается его изменение.

Если зависимость $Q = f(z)$ изображается в виде ломаной, то потери напора внутри приемной части несущественны и распределение притока в пределах фиксируемых интервалов квазиравномерное. В этом случае коэффициент фильтрации следует рассчитывать исходя из формул квазиравномерного притока. Зависимость $S'_c = f(Q)$ при квазиравномерном притоке может быть представлена как прямой, так и кривой. Наличие нелинейной связи обуславливается влиянием потерь напора при прохож-

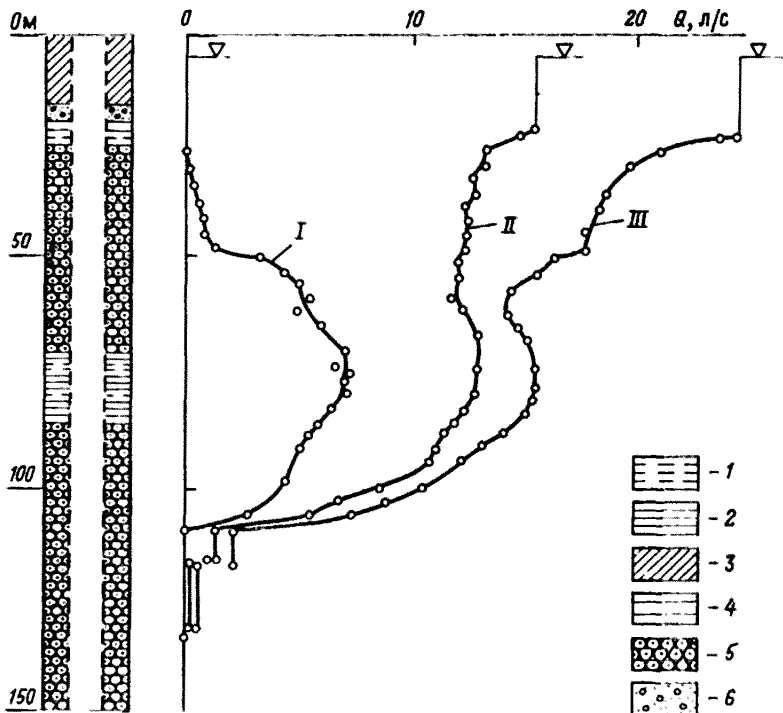


Рис. VII. 4. Расходограмма скважины при статическом (I) и динамическом (II, III) режимах:

1 — алевролит; 2 — глина; 3 — суглинок; 4 — аргиллит; 5 — песчаник; 6 — гравийно-галечниковые отложения

дении жидкости через приемную поверхность скважины. Если же $Q_z = f(z)$ в каком-либо интервале представляет собой кривую и проверка (см. § 2 настоящей главы) показывает, что в его пределах проницаемость по разрезу практически постоянна, то коэффициент фильтрации пород следует рассчитывать по формулам неравномерного притока. Зависимость $S'_c = f(Q)$ при неравномерном притоке всегда нелинейна. Расходограммы при неравномерном притоке в скважину представлены на рис. VII. 4 [13].

При наличии перетока внутри ствола скважины статические уровни отдельных слоев определяют путем графической экстраполяции зависимости расхода слоя (пласта) Q_n от глубины залегания динамического уровня (напора) воды h_d . Расходограммы при статическом и динамическом режимах, а также пример экстраполяции зависимости $Q_n = f(h_d)$ приведены на рис. VII. 5. Координата точки пересечения зависимости $Q_n = f(h_d)$ с осью абсцисс даст величину статического уровня в тех же

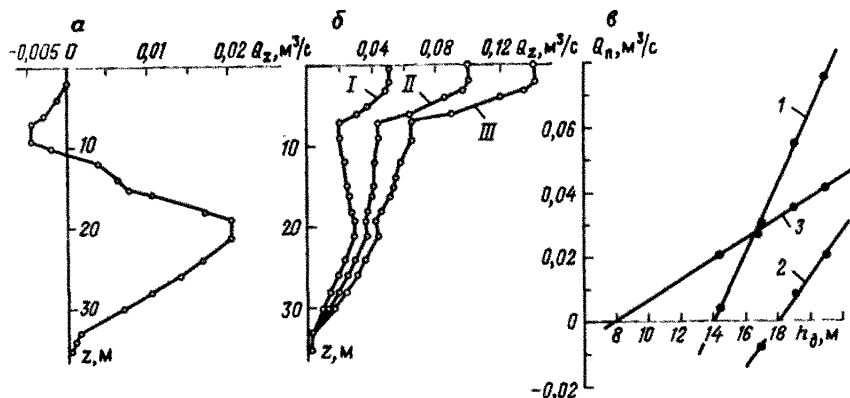


Рис. VII. 5. Расходограмма скважины при статическом (а) и динамическом (б) режимах для разوناпорной толщи и зависимость $Q_n = f(h_d)$ (в):

1, II, III — ступени понижения уровня; 1, 2, 3 — интервал притока соответственно 2–7; 9–19 и 21–36 м.

отметках, в которых измерялись глубины залегания динамических уровней. Если зависимость $Q_n = f(h_d)$ выражена прямой, экстраполяция осуществляется без каких-либо осложнений. В случае нелинейной зависимости $Q_n = f(h_d)$ статические уровни могут быть найдены аналитическим путем по эмпирической формуле при $Q_n = 0$. Эмпирическую формулу $Q_n = f(h_d)$ целесообразно подбирать методом выравнивания экспериментальной кривой. В частности, если зависимость $Q_n = f(h_d)$ может быть представлена в виде $Q_n = a h_d^n$, то выравниваются $X = \ln h_d$ и $Y = \ln Q_n$. Другие возможные варианты выравнивания приводятся в справочниках по математике.

Данные расходомерии скважин при квазиравномерном притоке обрабатываются по формулам (VII. 11) — (VII. 18). В процессе опытно-фильтрационных и каротажных работ замеры уровня воды в скважине и фиксация расхода в ее приемной части должны производиться с минимальной разницей во времени во избежание излишних погрешностей. Наиболее надежен графоаналитический метод определения коэффициента фильтрации пород по данным расходомерии и откачки с тремя ступенями понижения уровня. Исходные уравнения (VII. 11) и (VII. 12) представляются в виде уравнения прямых:

$$S'_i / (\Delta Q / \Delta m)_i = A_i + B_i (\Delta Q / \Delta m)_i \quad \text{и} \quad S'_c / Q_i = A_c + B_c Q_i, \quad (\text{VII. 21})$$

где S'_i и S'_c — соответственно действующие понижения уровня воды в однородном i -м слое (пласте) и скважине при дебите Q_i ; k_i — коэффициент фильтрации i -го слоя:

$$A_i = \frac{1}{2\pi k_i} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_i + \frac{\bar{k}_L L}{km} R^{**} \right]; \quad B_i = \frac{1}{2g (\pi D \psi_i)^2};$$

$$A_c = \frac{1}{2\pi k_L L} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)_c + \frac{\bar{k}_L L}{km} R^{**} \right]; \quad B_c = \frac{1}{2g (\pi D \psi_c L)^2}.$$

Определяя по графикам $S'_i / (\Delta Q / \Delta m)_i = f(\Delta Q / \Delta m)$ и $S'_c / Q_i = f(Q_i)$ коэффициенты A и B , а по опытной скважине общую проводимость $\bar{k}m$, найдем значения коэффициентов фильтрации отдельных слоев исходя из следующего соотношения для совершенной по степени вскрытия скважины:

$$k_i = \frac{A_c}{A_i} \bar{k}m. \quad (\text{VII. 22})$$

Для несовершенной одиночной скважины находятся относительные значения коэффициентов фильтрации:

$$k_i/k_0 = A_0/A_i, \quad (\text{VII. 23})$$

где k_0 и A_0 — параметры наиболее водообильного в разрезе слоя.

При наличии наблюдательной скважины и $(\xi_n + \xi_\phi) \approx 0$ коэффициенты фильтрации в случае несовершенной скважины определяются из соотношения

$$k_i = \frac{A_c}{A_i} k_L L, \quad (\text{VII. 24})$$

где $k_L L$ — рассчитывается по (VII. 18).

Коэффициент истечения жидкости находится согласно экспликациям к (VII. 21) по следующим зависимостям:

$$\psi_i = \frac{1}{\pi D \sqrt{2g B_i}} \quad \text{и} \quad \psi_c = \frac{1}{\pi D L \sqrt{2g B_c}}. \quad (\text{VII. 25})$$

Расчет k_i графоаналитическим методом возможен также по зависимости (VI. 10), которую удобно представить в виде уравнения прямой

$$Q = B (\Delta Q / \Delta m)_i, \quad (\text{VII. 26})$$

где $B = k_L L / k_i$ или $B = \bar{k}m / k_i$.

В случае одной ступени понижения расчет абсолютного или относительного значения k_i можно выполнить непосредственно по зависимостям (VII. 11) — (VII. 16) с учетом соответствующих условий, оговоренных в § 3 настоящей главы.

Интегральная величина водопроводимости разреза в направлении снизу — вверх находится согласно зависимости (VII. 17) :

$$\sum_{i=1}^n (km)_i = \bar{k}_L L \bar{Q}_z, \quad (\text{VII. 27})$$

где n — число слоев; $(km)_i$ — проводимости отдельных слоев; \bar{Q}_z — относительный расход в рассматриваемом конечном сечении z .

Представляется весьма перспективным использование зависимостей (VII. 17), (VII. 23) и (VII. 27) для построения дифференциальных и интегральных кривых водопроводимости пород при оценке изменчивости фильтрационных свойств по разрезу.

Как следует из § 3 настоящей главы, абсолютные или относительные значения коэффициентов фильтрации (проводимости) пород, вычисленные по формулам (VII. 22) — (VII. 27), будут тем ближе к истинным, чем меньше разность между коэффициентами $(\xi_n + \xi_\phi)_i$ и $(\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)$ независимо от их абсолютных значений. Минимальное расхождение будет отмечаться при $(\xi_n + \xi_\phi)_i \approx (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi)$ или $(\xi_n + \xi_\phi) \approx (\bar{\xi}_n + \bar{\xi}_\phi) \approx 0$, т.е. когда нарушение в призабойной зоне по длине приемной части одинаково или мало по абсолютной величине.

Данные расходомерии при неравномерном притоке обрабатываются по формулам (VII. 9), (VII. 10), (VII. 19), (VII. 20), которые с учетом допущения о возможности пренебрежения Δh_ψ (см. § 3 настоящей главы) можно представить в виде уравнения прямых:

$$\frac{S'_z}{Q} = A_z + B_z \frac{1}{Q} \left(\frac{dQ}{dz} \right)_z \quad \text{и} \quad \frac{\bar{S}}{Q} = A_i + B_i \frac{1}{Q} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta m} \right)_i, \quad (\text{VII. 28})$$

где

$$A_z = \frac{1}{2\pi \bar{k}_m} R^{**}; \quad B_z = \frac{1}{2\pi k_z} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_z \right];$$

$$A_i = \frac{1}{2\pi \bar{k}_m} R^{**}; \quad B_i = \frac{1}{2\pi k_i} \left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi)_i \right].$$

Так же как и при квазиравномерном притоке, наиболее надежным является графоаналитический метод при трех ступенях понижения уровня. Определяя по графику $S'_z/Q = f(Q'/Q)$ коэффициенты B_z в выбранных сечениях, находим среднее значение B_z в пределах однородной зоны, а затем независимо от степени вскрытия пласта и значение коэффициента фильтрации пород, если $\xi_n + \xi_\phi \approx 0$ или $\ln(\bar{e}m/r_0) \gg (\xi_n + \xi_\phi)$:

$$k_z = \frac{\ln(\bar{e}m/r_0)}{2\pi B_z}. \quad (\text{VII. 29})$$

Для совершенной по степени вскрытия скважины при $|\xi_n + \xi_\phi| > 0$, но $\xi_n + \xi_\phi \approx \xi_n + \xi_\phi'$:

$$k_{z,0} = \frac{\bar{k}m}{\bar{B}_{z,0} \left[\frac{m_1}{B_{z,1}} + \frac{m_2}{B_{z,2}} + \dots + \frac{m_0}{B_{z,0}} + \dots + \frac{m_{n-1}}{B_{z,(n-1)}} + \frac{m_n}{B_{z,(n)}} \right]} \quad (\text{VII. 30})$$

$$k_{z,i} = k_{z,0} \frac{\bar{B}_{z,0}}{\bar{B}_{z,i}}, \quad (\text{VII. 31})$$

где $k_{z,0}$, m_0 и $B_{z,0}$ — параметры наиболее водообильного в разрезе слоя; $\bar{B}_{z,i}$ — средние значения коэффициента B_z в пределах однородной зоны; $i = 1, 2, 4 \dots$ — порядковый номер однородной зоны.

Для несовершенной по степени вскрытия скважины при тех же условиях относительные значения коэффициентов фильтрации пород равны

$$k_{z,i}/k_{z,0} = \bar{B}_{z,0}/\bar{B}_{z,i}. \quad (\text{VII. 32})$$

В общем случае наиболее достоверны значения коэффициента k_z , вычисленные в сечениях, располагающихся в средней части кусочно-однородной зоны, а наименее достоверны — на контактах зон разной проницаемости и вблизи нейтральной точки, где справедливы зависимости квазиравномерного движения.

Обработка зависимости среднеинтегральных понижений от средней интенсивности притока в пределах однородной зоны сводится к определению коэффициента B_i прямой $\bar{S}/Q = \varphi[(\Delta Q/\Delta m)/Q]$ и последующему расчету k_z по соотношениям, аналогичным (IV. 30) — (VII. 32).

Теоретически оба описанных метода равноценны. Практически более точен метод определения коэффициентов k_z по среднеинтегральному понижению и средней интенсивности притока. Вычисления на основе частных значений S'_z и производных Q' связаны с большими погрешностями.

Аналитический расчет k_z (одна ступень понижения уровня) может производиться исходя из уравнений (VII. 9), (VII. 10), (VII. 19) и (VII. 20), разрешенных относительно k_z или k_z^* . Более предпочтителен вариант расчета по среднеинтегральному понижению. При наличии наблюдательной скважины и совершенной по степени вскрытия опытной скважины абсолютное значение коэффициента фильтрации пород однородной зоны находится из выражения

$$k_z = \frac{\left[\ln \frac{\bar{e}m}{r_0} + (\xi_n + \xi_\phi) \right] \frac{\Delta Q}{\Delta m}}{2\pi(\bar{S} - S_n) + \frac{Q}{\bar{k}m} \ln \frac{\bar{e}m}{r}} z', \quad (\text{VII. 33})$$

где S_n — понижение уровня воды в наблюдательной скважине, отстоящей от опытной на расстоянии $r \geq 0,3m$.

Все замечания по точности результатов обработки расходомерии квазиравномерного притока в связи с нарушениями в призабойной зоне справедливы и для случая неравномерного притока.

При определении фильтрационной неоднородности разреза глубокозалегающих водоносных горизонтов во всех приведенных выше формулах следует заменить понижение уровня воды на разность давлений, а коэффициент фильтрации на коэффициент проницаемости по соотношениям

$$S = \frac{\Delta p}{\gamma_w} \quad \text{и} \quad k = k_{пр} \frac{\gamma_w}{\mu_w},$$

где γ_w — удельный вес воды; $k_{пр}$ — коэффициент проницаемости; μ_w — динамический коэффициент вязкости.

Выводы

1. Пьезорасходомерия скважин является прямым методом определения пропускной способности пористых и трещиноватых сред. Данные одновременного измерения скоростей потока и напоров внутри скважины достаточны для характеристики фильтрационных свойств пород неоднородной толщи. При малых нарушениях призабойной зоны или одинаковой степени ее нарушенности по длине вскрытой части разреза (независимо от абсолютной величины нарушения) с помощью методов расходомерии и пьезометрии могут быть достаточно четко выделены проницаемые и слабопроницаемые зоны, определены фильтрационные свойства или относительная проводимость пород, эффективная мощность отдельных пластов и статические уровни водоносных горизонтов. Полученные абсолютные или относительные величины коэффициентов фильтрации (проводимости) позволяют построить профиль продуктивности или приемистости неоднородной толщи по разрезу.

2. Данные пьезорасходомерии должны интерпретироваться с учетом деформации потока, обусловленной неполным вскрытием пласта, нарушением призабойной зоны и гидравлическим сопротивлением скважины.

По данным опробования одиночных скважин расчет абсолютных значений коэффициентов фильтрации (проводимостей) пород возможен, если опытная скважина совершенна по степени вскрытия пласта. Для одиночных несовершенных скважин определяются лишь относительные значения. Полученные величины будут тем ближе к истинным, чем качественнее вскрыт пласт и меньше разность между коэффициентами дополнительного сопротивления, обусловленными нарушениями призабойной зоны.

При прочих равных условиях влияние сопротивления скважины на

характер распределения притока и напоров тем больше, чем интенсивнее отбор воды. Нелинейность графика расхода (скорости) и напора от глубины его измерения показывает наличие ощутимых гидравлических потерь в скважине. Если зависимость $Q = f(z)$ представлена отрезками прямых линий, то сопротивление скважины при данном отборе воды практически незначительно. Из этого правила есть исключение для случая непрерывного уменьшения k_z вверх по разрезу. Следует также отметить неправомерность вывода о незначительности гидравлических потерь в скважине на основании характера графика $Q = f(S)$, который может иметь практически незначительную выпуклость, хотя потери напора, обусловленные гидравлическим сопротивлением скважины, существенны.

3. При малой величине гидравлического сопротивления совершенной по степени вскрытия скважины интерпретация данных расходомерии может основываться на предположении, что в каждом элементарном слое разреза приток воды к скважине подчиняется уравнению Дюпюи. Если потери напора вследствие гидравлического сопротивления скважины существенны или малы, но скважина несовершенна по степени вскрытия, то это предположение неверно, так как в зоне $r_0 \leq r \leq 0,25m$ движение потока носит пространственно-радиальный характер.

Пренебрежение деформацией потока в зоне скважины приводит к тому, что для идеально-однородного в разрезе пласта значения k_z , вычисленные по формуле Дюпюи, возрастают по направлению забой — устье скважины. Совпадение расчетного и истинного значений k_z отмечается в одной точке кривой $Q = f(z)$, угловой коэффициент касательной к которой равен Q/m . Таким образом, в нижней части однородного разреза расчетные значения k_z будут меньше, а в верхней — больше истинных.

Аналогичное явление наблюдается в случае однонапорной неоднородной толщи и значительного сопротивления скважины. Однако внутри каждой кусочно-однородной области отклонение возрастающих к устью скважины расчетных значений k_z остается постоянным по знаку и лишь вблизи нейтральной точки поправка меняет знак. В разнонапорной неоднородной толще с изолированными пластами расчетные значения также увеличиваются к устью скважины, но в каждой кусочно-однородной зоне имеется точка, в которой расчетные и истинные значения совпадают. Введение поправок в действующие понижения уровня при неизменной величине притока не повышает точности расчета. При равномерном притоке и несовершенстве скважины по степени вскрытия значения k_z , вычисленные исходя из предпосылки Дюпюи, могут возрастать или убывать в направлении забой — устье скважины в зависимости от соотношения проницаемостей вскрытой и невскрытой частей пласта. При этом абсолютные значения расчетного k_z всегда выше истинной величины. Ошибка тем больше, чем меньше проницаемость вскрытой части пласта. Равенство суммы расчетных проводимостей истинной, определенной по наблюдательной

или опытной скважине, не является критерием достоверности вычисленных частных значений коэффициентов фильтрации пород отдельных слоев.

4. Применение предложенного принципа однородности не ограничивается разработанной методикой разделения пласта на отдельные кусочно-однородные зоны. Благодаря тому что принцип однородности выражает наиболее общее свойство процесса передачи возмущения в системе, то вытекающие из него следствия можно использовать для решения широкого круга обратных задач, в которых по реакции пласта на вызываемое возмущение требуется определить параметры возмущенной системы. Решение этих задач возможно как при нарушенном, так и при естественном режимах движения подземных вод. С точки зрения процесса возмущения между нарушенным и естественным движением подземных вод больше сходства, чем различия: одно и другое движения совершаются под действием внешних сил, разница лишь в интенсивности и продолжительности их воздействия.

5. Использование комплексного метода пьезорасходомерии может быть эффективно на стадиях поиска, предварительной разведки и составления технико-экономического доклада для решения вопроса о наиболее рациональных путях строительства водозаборных, водопонизительных, гидротехнических сооружений и подземных хранилищ газа в водоносных пластах. Весьма перспективно применение метода пьезорасходомерии для обоснования фильтрационной расчетной схемы участка изысканий и региональной гидрогеологической модели многопластовых систем.

Глава VIII

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТА И СКВАЖИНЫ

§ 1. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ НЕОДНОРОДНОЙ ТОЛЩИ

Методы определения соответствующих параметров рассмотрены на ряде примеров, что дало возможность более четко показать последовательность рекомендуемых расчетов, выявить необходимый минимум исходных данных для решения поставленных задач и соотнести полученные результаты с расчетами, выполняемыми в предпосылке однородности пласта и незначительности гидравлического сопротивления скважины. При вычислении коэффициентов фильтрации отдельных слоев в качестве исходного материала были взяты данные моделирования неоднородной толщи на электрической модели системы пласт — скважина и ЭКВМ "Искра-125", что позволило оценить фактическую погрешность предлагаемых способов расчета для различных параметров пласта и скважины, значение которых известно (задано на модели и ЭКВМ).

Пример 1. Совершенная по степени вскрытия скважина вскрыла напорный водоносный горизонт, представленный чередованием песков и глин мощностью 36 м. Замеренная глубина залегания статического уровня $h_0 = 14,44$ м. При статическом режиме была произведена расходометрия, график которой представлен на рис. VII. 5, а.

Согласно графику $Q_z = f(z)$ неоднородная толща состоит из трех пластов мощностью 5, 10 и 15 м, разделенных двумя слабопроницаемыми перемиками мощностью 2 м каждая. На основании графика можно сделать заключение, что вода из первого и третьего пластов перетекает во второй пласт.

Для определения статических уровней водоносных пластов проводилась откачка тремя ступенями понижения. В конце каждой ступени выполнена расходометрия. По наблюдательной скважине были получены величины общей проводимости $km = 2950 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $\sum z^* = 0$. Результаты опытно-фильтрационных и коротажных работ для нижнего пласта приведены в табл. VIII. 1 (графы 4, 6, 8). Общая зависимость $Q_z = f(z)$ в динамическом режиме (см. рис. VII. 5, б) представлена ломаной, а зависимость $Q = f(S)$ — прямой [график $A = f(S)$ не приводится]. Следовательно, распределение притока вдоль приемной части скважины равномерное. Причем потери напора на прохождение воды через боковую поверхность Δh_{ψ} малы. Поэтому, учитывая совершенство скважины по степени вскрытия и незначительность нарушения призабойной зоны, коэффициенты фильтрации отдельных слоев рассчитаем по зависимости (VII. 14), в которой примем $k_{\perp} L = km$.

Для определения действующих понижений вначале рассчитаем величину расходов каждого слоя Q_i (см. табл. VIII. 1). Построив зависимости $Q_i = f(h_{i\text{ст}})$, путем экстраполяции найдем статические уровни (в м) в выделенных пластах: $h_{1\text{ст}} = 14$ м, $h_{2\text{ст}} = 18$ м и $h_{3\text{ст}} = 8$ м (см. рис. VII. 5, в).

Имея динамические уровни воды для каждой ступени понижения, определим S'_i . Исходя из величин частных расходов Q_i рассчитаем приращения расходов ΔQ в каждом слое (см. табл. VIII. 1, графы 5, 7, 9), а по графику $Q_z = f(z)$ найдем значения мощности каждого слоя Δl .

Подставляя полученные величины соответствующих параметров в формулу (VII. 14), рассчитаем коэффициенты фильтрации (в м/сут) отдельных слоев: $k_{10} = 28$, $k_{11} = 40$ и $k_{12} = 10$.

Пример 2. Совершенная по степени вскрытия скважина была пробурена в напорном водоносном горизонте, представленном песками различной зернистости, мощностью 60 м. Бурение осуществлялось роторным способом с промывкой забоя глинистым раствором. После прокачки скважины при статическом режиме проводилась расходометрия, которая показала отсутствие перетоков внутри приемной части скважины. Отсюда следует, что водоносный горизонт представляет собой однонапорную систему.

Опытная откачка была выполнена тремя ступенями понижения. В конце каждой ступени выполнялась расходометрия. Водопроницаемость пласта по данным замеров уровня воды в опытной скважине $km = 1240 \text{ м}^2/\text{сут}$. Результаты опытно-фильтрационных работ приведены в табл. VIII. 2 (графы 1, 2, 3), расходограммы — на рис. VIII. 1, а.

Зависимость $Q_z = f(z)$ представлена ломаной (рис. VIII. 1, а), а зависимость $Q = f(S)$ — прямой (рис. VIII. 1, б). Следовательно, распределение притока вдоль приемной части скважины равномерное и потери напора на прохождение воды через боковую поверхность приемной части Δh_{ψ} малы. Согласно графику $Q = f(z)$ неоднородная толща состоит из трех гидравлически связанных пластов мощностью по 20 м каждый. Судя по наклону прямых, наиболее водообильный пласт залегает в нижней части разреза, в средней части разреза проводимость невелика.

Таблица VIII. 1

Номер слоя	z, м	Δm , м	Первая ступень ($Q_1 =$ $= 0,10 \text{ м}^3/\text{с}; h_{\text{д}} = 19,25 \text{ м}$)		Вторая ступень ($Q_2 =$ $= 0,05 \text{ м}^3/\text{с}; h_{\text{д}} = 16,84 \text{ м}$)		Третья ступень ($Q_3 =$ $= 0,139 \text{ м}^3/\text{с}; h_{\text{д}} = 21,12 \text{ м}$)	
			$Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$
9	19	2	35,690	0,00	28,070	0,00	41,620	0,00
	21		35,690		28,070		41,620	
10	21	5	35,690	11,11	28,070	8,74	41,620	12,94
	23		31,250		24,570		36,450	
	24		29,030		22,820		33,860	
	26		24,580		19,330		28,680	
11	26	7	24,580	22,20	19,330	17,46	28,680	25,90
	28		18,240		14,340		21,270	
	30		11,900		9,353		13,880	
	33		2,380		1,870		2,775	
12	33	3	2,380	2,38	1,870	1,87	2,775	2,78
	34		1,585		1,248		1,850	
	35		0,793		0,624		0,925	
	36		0,000		0,000		0,000	

Примечание. Для первой, второй и третьей ступеней соответственно $Q_n \cdot 10^3 = 35,69; 28,07; 41,62 \text{ м}^3/\text{с}$ и $S'_z = 11,25; 8,84; 13,12 \text{ м}$.

$Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$S'_i, \text{ м}$	$S'_c/Q, \text{ с}/\text{м}^2$	Номер слоя	$\Delta Q \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta m, \text{ м}$	$(\Delta Q/\Delta m)_i, 10^4, \text{ м}^2/\text{с}$	$\frac{S'_i}{(\Delta Q/\Delta m)_i} \cdot 10^4, \frac{\text{с}}{\text{м}}$
9,95	1,90	190,7	1	1,61	20	0,805	2,360
			2	0,287	20	0,144	13,20
			3	8,05	20	4,025	0,472
20,0	3,81	190,7	1	3,23	20	1,615	2,359
			2	0,577	20	0,288	13,23
			3	16,19	20	8,095	0,471
40,0	7,63	190,7	1	6,47	20	3,235	2,359
			2	1,15	20	0,575	13,27
			3	32,38	20	16,19	0,471

В качестве исходной примем формулу (VII. 21), так как приток квазиравномерный и скважина бурилась роторным способом с промывкой забоя глинистым раствором, в соответствии с формулой (VII. 21) строим зависимости $S'_c/Q = f(Q)$ и $S'_i/(\Delta Q/\Delta m)_i = f(\Delta Q/\Delta m)_i$ (рис. VIII. 1, а, з, д). Согласно приведенным графикам коэффициент B построенных прямых равен нулю, следовательно, потери напро на прохождение воды через приемную поверхность Δh_ψ ничтожны, что подтверждает ранее сделанный вывод на основании графика $Q = f(S)$. Таким образом,

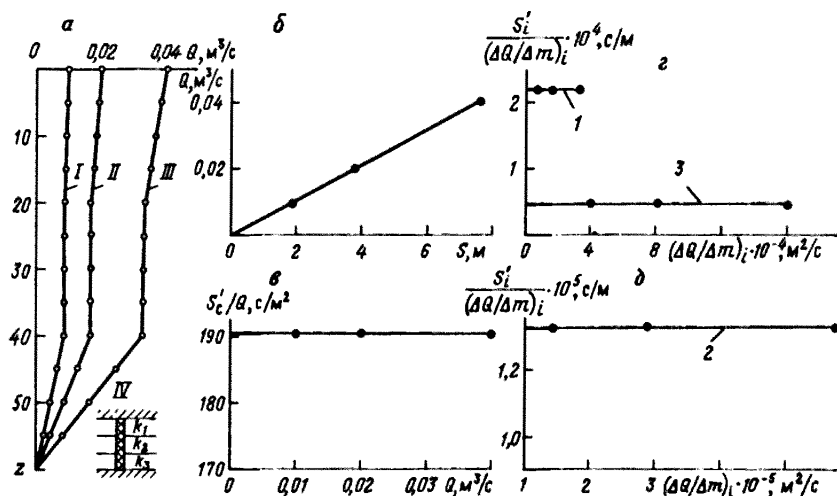


Рис. VIII. 1. Расходограмма скважины (а) и графики для обработки данных расходомерии (б, в, з, д) при $\Delta h_\lambda = 0$; $\Delta h_\psi = 0$; $\xi_{21} = \xi_{22} = \xi_{23} = 9,0$; $\psi \rightarrow \infty$:

I, II, III — ступени понижения уровня; IV — схема вскрытия пласта; 1, 2, 3 — номера пластов

если распределение притока вдоль приемной части скважины равномерное, то показатель малых потерь напора Δh_{ψ} — линейность графика $Q = f(S)$ или равенство нулю коэффициента B прямых удельного понижения.

Определив значения коэффициентов A_c (рис. VIII. 1, а) и A_i (рис. VIII. 1, г, д), найдем значения коэффициентов фильтрации отдельных пластов по формуле (VII. 22). Результаты расчета приведены ниже.

Номер пласта	1	2	3
ξ_2^* (модель)		9	
A_c , с/м^2		190,7	
$A_i \cdot 10^4$, с/м	2,360	13,200	0,471
k_i , м/сут.			
модель	10,0	2,0	50,0
расчет	10,0	1,8	50,2

Кек видно, при одинаковой степени нарушения призабойной зоны по длине приемной части расчетные значения коэффициентов фильтрации пород практически равны истинным (модельным), несмотря на достаточно большие абсолютные значения коэффициента ξ_2^* .

Выполненные расчеты и сравнение полученных результатов с данными моделирования показали, что и при разной степени нарушения призабойной зоны значения коэффициентов фильтрации пород достаточно близки к истинным (модельным). При этом ξ_2^* отличались приблизительно в пять раз. Наибольшее расхождение отмечалось для наименее водообильного пласта.

Пример 3. Скважиной вскрыт напорный водоносный горизонт, представленный песками разной зернистости. Мощность вскрытой толщи 30 м; общая мощность горизонта согласно имеющимся материалам около 60 м. Бурение осуществлялось роторным способом с промывкой забоя глинистым раствором. После прокечки при статическом режиме была проведена расходометрия, которая показала отсутствие перетоков внутри приемной части скважины. Отсюда следует, что водоносный горизонт представляет собой однонапорную систему.

Опытная откачка производилась тремя ступенями понижения. В конце каждой ступени была выполнена расходометрия. Величина водопроницаемости по данным замеров уровня воды в опытной скважине $km = 1240 \text{ м}^2/\text{сут.}$ Результаты опытно-фильтрационных работ приведены в табл. VIII. 3 (графы 1, 2, 3), а расходограммы — на рис. VIII. 2, а.

Таблица VIII. 3

$Q \cdot 10^3$, $\text{м}^3/\text{с}$	S'_i , м	S'_c/Q , с/м	Номер слоя	$\Delta Q \cdot 10^3$, $\text{м}^3/\text{с}$	Δm , м	$(\Delta Q / \Delta m)_i \cdot x$ $\times 10^4$, $\text{м}^2/\text{с}$	$\frac{S'_i}{(\Delta Q / \Delta m)_i} \cdot x$ $\times 10^4$ с/м
39,8	41,78	1061	1	33,6	20	16,78	2,488
			2	6,20	10	6,20	6,739
19,8	17,36	875	1	17,3	20	8,70	2,010
			2	2,57	10	2,57	6,755
9,97	7,75	777	1	8,81	20	4,40	1,760
			2	1,16	10	1,16	6,652

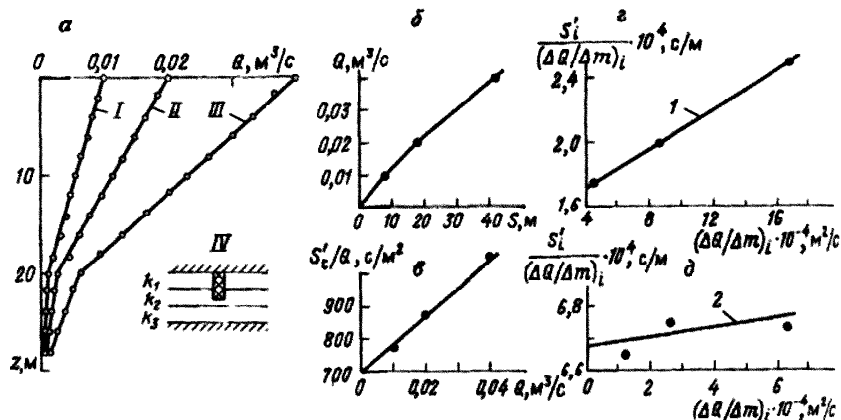


Рис. VIII. 2. Расходограмма скважины (а) и графики для обработки данных расходомерии (б, в, з, д) при $\Delta h_\lambda = 0$; $\Delta h_\psi \neq 0$; $\psi_1 = \psi_2 = 2 \cdot 10^{-6}$; $\zeta_{21} = \zeta_{22} = 4,0$. I, II, III – ступени понижения уровня; IV – схема вскрытия пласта; 1, 2 – номера пластов

Зависимость $Q_z = f(z)$ представлена ломаной (см. рис. VIII. 2, а), а зависимость $Q = f(S)$ нелинейна (рис. VIII. 2, б). Следовательно, хотя распределение притока вдоль приемной части скважины равномерное, потери напора на прохождении воды через ее боковую поверхность Δh_ψ существенны.

Согласно графику $Q_z = f(z)$ вскрытая часть водоносного горизонта состоит из двух пластов. Судя по наклону прямых, более водообильный пласт залегает в верхней части разреза.

В качестве исходной следует принять формулу (VII. 21), так как приток равномерный, а потери напора Δh_ψ существенны.

Рассчитав необходимые параметры путем, аналогичным приведенному в примере 1, по графикам $S_e'/Q = f(Q)$ и $S_e'/(Q \Delta Q/\Delta m)_1 = f(Q \Delta Q/\Delta m)_1$, определим коэффициенты A_j и B_j (см. рис. VIII. 2, в, з, д). Причем в связи с несовершенством скважины по степени вскрытия ($m_p \approx 0,5$) на основании значений параметров A_j можно найти лишь соотношения коэффициентов фильтрации пород по формуле (VII. 23). Коэффициент истечения жидкости определяется по (VII. 25). Результаты расчета приведены ниже.

Номер пласта	1	2
ζ_2^* (модель)	4	4
$A_j \cdot 10^4$, с/м	1,50	6,68
k_1/k_2 :		
модель	1,00	0,20
расчет	1,00	0,22
$B_j \cdot 10^6$	5,88	1,57
$\psi \cdot 10^4$:		
модель	2	2
расчет	1,98	3,83

Если условно принять, что проводимость в пределах вскрытой части пласта известна, т.е. равна модельной величине, то расчетные величины коэффициентов

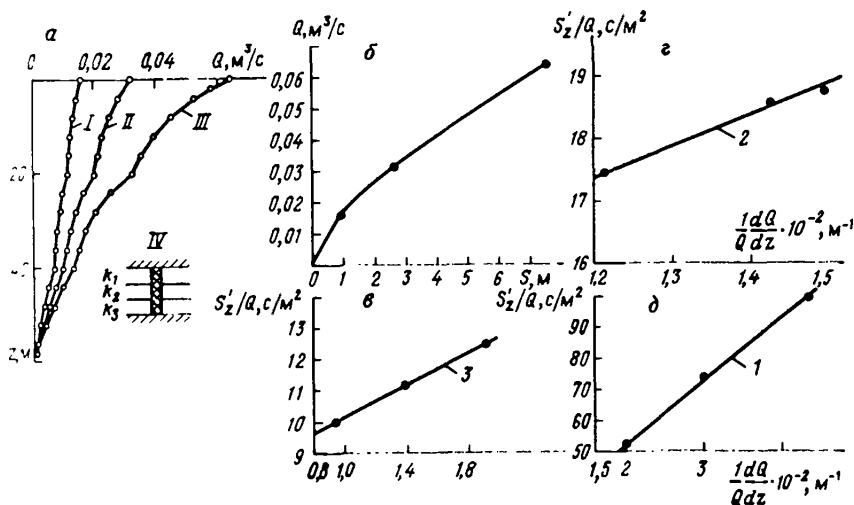


Рис. VIII. 3. Расходограмма скважины (а) и графики для обработки данных расходомерии (б, в, з, д) при $\Delta h_\lambda \neq 0$; $\Delta h_\psi \neq 0$; $\bar{m} = 1.0$; $\psi \rightarrow \infty$:

I, II, III — ступени понижения уровня; IV — схема вскрытия пласта; 1, 2, 3 — номера пластов

фильтрации пластов будут соответственно равны: $k_1 = 10.3 \text{ м/сут}$ и $k_2 = 2.3 \text{ м/сут}$. Истинные (модельные) величины этих же коэффициентов $k_1 = 10 \text{ м/сут}$ и $k_2 = 2 \text{ м/сут}$. Как и в предыдущем примере, наибольшие ошибки при определении k_2 и ψ_2 отмечаются для менее проницаемых слоев.

Пример 4. Совершенная по степени вскрытия скважина была пробурена в напорном водоносном горизонте мощностью 60 м. Бурение осуществлялось роторным способом с обратной промывкой водой. Учитывая незначительную деформацию пород в процессе данного способа бурения, примем $\xi_2^* \approx 0$.

После прокачки скважины при статическом режиме была произведена расходомерия, которая показала отсутствие перетоков внутри приемной части скважины. Отсюда следует, что водоносный горизонт представляет собой однонапорную систему.

Опытная откачка была проведена тремя ступенями понижений. В конце каждой ступени выполнялась расходомерия и замерялся уровень по длине приемной части скважины. Водопроницаемость по данным замеров уровня в опытной скважине $k_m = 8600 \text{ м}^2/\text{сут}$. Результаты опытно-фильтрационных работ в сокращенном виде приведены в табл. VIII. 4 (графы 2, 3, 7, 8, 12, 13), а расходограммы — на рис. VIII. 3, а.

Очевидно, что зависимости $Q_z = f(z)$ и $Q = f(S)$ нелинейные (рис. VIII. 3, а, б). В общем случае нелинейность этих функций может быть обусловлена потерями напора внутри приемной части скважин при постоянном значении k_z в пределах отдельных интервалов или же закономерным увеличением k_z по разрезу и наличием значительных потерь напора Δh_ψ . Выявление факторов, влияющих на характер зависимостей $Q_z = f(z)$ и $Q = f(S)$, имеет принципиальное значения, так как от этого зависит выбор или возможность применения имеющихся расчетных формул.

В приведенном примере согласно графику $Q_z = f(z)$ неоднородная толща состоит из трех гидравлически связанных пластов и мало вероятно, чтобы в каждом

z, м	Q = 63,8 л/с					Q = 31,9 л/с					Q = 15,8 л/с				
	$Q_z \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$S'_z, \text{ м}$	$S'_z/Q, \text{ с/м}^2$	$\frac{\Delta Q}{\Delta z} \cdot 10^3, \text{ м}^2/\text{с}$	$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dz} \cdot 10^2, \text{ м}^{-1}$	$Q_z \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$S'_z, \text{ м}$	$S'_z/Q, \text{ с/м}^2$	$\frac{dQ}{dz} \cdot 10^3, \text{ м}^2/\text{с}$	$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dz} \cdot 10^2, \text{ м}^{-1}$	$Q_z \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$S'_z, \text{ м}$	$S'_z/Q, \text{ с/м}^2$	$\frac{dQ}{dz} \cdot 10^3, \text{ м}^2/\text{с}$	$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dz} \cdot 10^2, \text{ м}^{-1}$
1	60,54	6,47	101,4	2,77	4,34	30,83	2,37	74,08	0,957	3,00	15,43	0,84	52,95	0,314	1,99
2	57,62					29,84					15,11				
3	55,00					28,92					14,80				
29	20,02	1,19	17,51	0,772	1,21	13,63	0,59	18,58	0,458	1,44	8,54	0,30	18,77	0,236	1,50
30	19,22					13,16					8,30				
31	18,47					12,71					8,07				
49	6,34	0,64	10,02	0,605	0,948	4,71	0,36	11,21	0,442	1,38	3,23	0,20	12,50	0,300	1,90
50	5,73					4,26					2,92				
51	5,13					3,83					2,63				

$z, \text{ м}$	$Q_z \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	\bar{Q}/\bar{z}	\bar{z}^2	Y
21	14,14	0,633	0,122	0,069
22	14,58	0,623	0,134	0,121
23	15,02	0,614	0,147	0,176
24	15,50	0,607	0,160	0,228
25	16,02	0,602	0,174	0,277
26	16,56	0,599	0,188	0,322
27	17,14	0,597	0,202	0,370
28	17,78	0,597	0,219	0,421
29	18,47	0,598	0,234	0,472
30	19,22	0,602	0,250	0,511
31	20,02	0,607	0,267	0,562
32	20,90	0,614	0,284	0,607
33	21,88	0,623	0,302	0,658
34	22,94	0,634	0,321	0,737
35	24,12	0,648	0,340	—
36	25,43	0,664	0,360	0,800
37	26,88	0,683	0,380	0,875
38	28,51	0,706	0,401	0,934
39	30,38	0,732	0,422	1,024
40	32,64	0,767	0,444	0,444

Примечание. $Q \cdot 10^3 = 63,84 \text{ м}^3/\text{с}$; $z_L = 60 \text{ м}$; $z_1^2 = 0,340$; $Q_1 = 0,378$.

из пластов величина k_z закономерно увеличивалась вверх по разрезу. Однако для окончательного решения вопроса проверим однородность пластов.

С этой целью в соответствии с § 2 гл. VII построим зависимость $\bar{Q}/\bar{z} = f(\bar{z}^2)$ или $\bar{v}/\bar{z} = f(\bar{z}^2)$ (см. рис. VII, 2, б) и в каждом интервале произвольно выберем одну фиксированную точку \bar{z}^2 . После этого по формуле (VII. 6) найдем значения φ и построим график $\varphi = f(\bar{z}^2)$. Исходные данные и расчет для второго пласта приведены в табл. VIII. 5, а график для всего горизонта показан на рис. VII. 2, в, на котором зависимость $Y = f(\bar{z}^2)$ представлена отрезками прямых. Следовательно, водоносный горизонт состоит из кусочно-однородных пластов и нелинейность $Q = f(z)$ и $Q = f(S)$ обусловлена потерями напора внутри приемной части скважины, т.е. распределение притока неравномерное. Поэтому в качестве исходного приемем графоаналитический способ определения k_z , основанный на зависимости (VII. 28).

В соответствии с выбранным способом рассчитываем величины S_z'/Q и $\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dz}$ (табл. VIII. 4, графы 4, 6, 9, 11, 14, 16), причем значение производной находим по формуле численного дифференцирования при $n=2$ (три точки):

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{1}{2h} (Q_2 - Q_0),$$

где h — шаг опробования.

Построив графики $\frac{S_z}{Q} = f\left(\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dz}\right)$ (см. рис. VIII. 3, в, з, д) для разных сечений z , расположенных внутри однородных зон, определим коэффициенты B_z и на их основании по (VII. 28) найдем коэффициенты фильтрации отдельных пластов. Результаты расчета приведены ниже:

\bar{m}	1,0		
Номер пласта.	1	2	3
$z, \text{ м}$	2	30	50
$B_z \cdot 10^{-3}, \text{ м/с}$	2,060	0,465	0,259
$k_z, \text{ м/сут}$			
модель.	30	100	300
расчет	33	148	266

С целью выявления наименее достоверного расчетного значения коэффициента фильтрации пород определим интервал нахождения нейтральной точки. Согласно (IV. 33) для первого, второго и третьего пластов вычисленные величины первых производных расхода по ординате z соответственно $(dQ/dz) = 171 \text{ м}^2/\text{сут}$; $(dQ/dz)_2 = 94,9 \text{ м}^2/\text{сут}$; $(dQ/dz)_3 = 21,8 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Сравнивая расчетные и фактические значения dQ/dz^* (см. § 3 гл. VI), найдем, что нейтральная точка расположена в интервале второго пласта я, следовательно, значение $k_z = 148 \text{ м/сут}$ наименее достоверно (таблице фактических значений dQ/dz не приводится). Действительно, согласно приведенным выше данным наибольшее отклонение расчетных от модельных значений k_j отмечается именно в этом интервале. Проверка на достоверность расчета по условию равенства суммы найденных проводимостей величине $\bar{k}m$, определенной по данным откачки, неэффективна: ошибки в определении k_z составляют 9,1 — 32,4 %, а расхождение между подсчитанной суммарной проводимостью и определенной по откачке всего 3,8 %.

Коэффициенты фильтрации отдельных квазиоднородных пластов можно определить также по зависимости (VII. 28) исходя из среднеинтегральных понижений уровня в каждом пласте. Эти понижения рассчитаем по формуле трапеции:

$$\bar{S} = \frac{1}{z_n - z_0} \int_{z_0}^{z_n} S dz = \frac{S_0 + S_n}{2} + (S_1 + S_2 + \dots + S_n);$$

где S_0 и S_n — понижения уровня соответственно в начальном и конечном сечениях квазиоднородного пласта (зоны).

Порядок расчета коэффициентов B_j и k_j аналогичен описанному выше. Результаты расчета следующие:

\bar{m}	1,0		
Номер пласта.	1	2	3
$z, \text{ м}$	2	30	50
$B_j \cdot 10^{-3}, \text{ с/м}$	2,222	0,633	0,253
$k_j, \text{ м/сут}$			
модель.	30	100	300
расчет	31	109	272

Помимо приведенных примеров были обработаны результаты других опытов, выполненных для разных дебитов и степени вскрытия пласта.

Обработка осуществлялась аналитически и графоаналитическим методами по зависимостям: (VII. 11) — (VII. 16), (VII. 21) — (VII. 26) в случае равномерного притока; (VII. 28) — (VII. 32) в случае неравномерного притока и (VII. 28), (VII. 33) при определении k_z на основе среднеинтегральных понижений уровня воды. Анализ полученного материала подтвердил, что наибольшие расхождения расчетных величин с истинными отмечаются в интервале нейтральной точки, где часто зависи-

мость $S_z'/Q = f(\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dz})$ нелинейна. Расчетное значение k_z в интервале нейтральной точки можно уточнить путем контрольного расчета по формуле (VII. 14), справедливой для квазиравномерного движения. При вычислении абсолютных и относительных значений коэффициентов фильтрации пород следует учитывать, что наиболее достоверными являются значения, полученные в интервале водообильного слоя (пласта).

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИНЫ

В качестве основных гидравлических параметров скважины можно принять параметр внутреннего сопротивления приемной части скважины F , параметр распределения притока γ или α и коэффициент гидравлического трения в глухих трубах λ . С помощью этих параметров можно найти потери напора при прохождении жидкости через скважину и такие гидравлические характеристики, как входная скорость $U(r_0, z)$, коэффициент гидравлического трения λ_z и интенсивность массопитока ω_z по длине приемной части.

Пример 1. На участке вертикального дренажа г. Каменка-Днепровская была пробурена совершенная скважина двухствольной конструкции (см. рис. V.13). Приемная часть скважины оборудована фильтром в виде перфорированной трубы с проволоочной обмоткой; внутренний диаметр фильтра $D_v = 0,14$ м, наружный $D = 0,15$; общая длина приемной части $L = 20,2$ м. Из скважины проводилась откачка с $Q = 38$ л/с, во время которой внутри фильтровой части скважины измерялись величины напоров. Согласно способу площадного прослеживания коэффициент фильтрации пласта принят $k_{ср} = 42,5$ м/сут. Величины фактических понижений уровня внутри фильтра приведены в табл. V. 5. Требуется определить параметры F и γ , гидравлические характеристики λ_z , ω_z и $U(r_0, z)$ при опытной откачке и эксплуатации скважины с иной проектной производительностью, а также понижения уровня воды.

По данным непосредственных измерений построим график $S_z = f(z)$ (см. рис. V. 14, а) и снимем со сглаженной кривой значения S_z через каждые 2 м. Величины S_z и потерь напора внутри фильтра помещены в табл. VIII. 6.

Определим параметр внутреннего сопротивления F по формуле (III. 58), для чего предварительно найдем значения Δh_L и v_L .

Согласно табл. VIII. 6 полная потеря пьезометрического напора $\Delta h_L = S_L - S_0 = 2,42$ м, а скорость в выходном сечении $v_L = 4Q/(\pi D_v^2) = 2,47$ м. Отсюда в соответствии с зависимостью (III. 58) параметр внутреннего сопротивления

$$F = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 2,42}{2,47^2} - 2 = 46,3.$$

По формуле (III. 57) найдем частные значения F в различных сечениях приемной части. Для этого сначала по зависимости (III. 53) определим значения S_z . Расчетные величины S_z и F приведены ниже.

z , м.	2	6	10	14	18	20
S_z , м.	5,14	5,24	5,50	5,95	6,76	7,45
S_z' ,	0,008	0,060	0,160	0,340	0,680	0,960
Δh_z , м.	0,02	0,12	0,38	0,83	1,64	2,33
F	48,3	45,7	45,1	46,8	46,0	46,4

$z, \text{ м}$	\bar{z}	$S_z, \text{ м}$	$\Delta h_z, \text{ м}$	$z, \text{ м}$	\bar{z}	$S_z, \text{ м}$	$\Delta h_z, \text{ м}$
0,0	0,000	5,12	0,00	12,0	0,594	5,70	0,58
2,0	0,099	5,14	0,02	14,0	0,693	5,95	0,83
4,0	0,198	5,18	0,06	16,0	0,792	6,27	1,15
6,0	0,297	5,24	0,12	18,0	0,891	6,76	1,64
8,0	0,396	5,35	0,23	20,0	0,990	7,45	2,33
10,0	0,495	5,50	0,38	20,2	1,000	7,54	2,42

Как видно из приведенного, величина обобщенного параметра F совпадает с частными значениями в различных сечениях приемной части, что свидетельствует о достаточной надежности выполненных расчетов.

Приближенную величину параметра F можно также найти по данным расходомерии, не измеряя напоры в приемной части скважины. Для этого вначале следует определить параметр распределения притока γ исходя из экспериментальной зависимости $\bar{Q} = f(\bar{z})$, а затем в соответствии с зависимостью (III. 18) рассчитать F (при расчете F и γ величина коэффициента фильтрации пород выражается в м/с) по выражению

$$F = 16(A\gamma \lg \gamma - 1), \quad (\text{VIII. 1})$$

$$\text{где } A = \frac{gD^2}{8k_z L v_L} \ln \frac{0,25m}{r_n}.$$

Расчетное значение F будет тем ближе к истинному, чем меньшую долю от общих потерь составляют потери напора на прохождение жидкости через приемную поверхность фильтра. Следует также отметить, что величины параметров F и γ , полученные по данным расходомерии скважины, имеют меньшую точность по сравнению со значениями, рассчитанными на основании замеров пьезометрических напоров в приемной части скважины, т.е. по данным пьезометрии скважин.

Для определения параметра γ по данным пьезометрии скважин необходимо построить в соответствующем масштабе зависимость $\bar{S}_z = f(z)$ (см. рис. V. 15, а) и наложить ее на палетку $\bar{S}_z = \lg^2 \gamma z / \lg^2 \gamma$ (рис. 4 приложения). Согласно палетке экспериментальный параметр $\gamma_s = 0,85$.

Параметры γ и α можно также найти и расчетным путем по выражениям (III. 18) и (III. 19) исходя из заданной величины средней скорости потока в выходном сечении. В соответствии с (III. 18) и рис. III. 2 при отборе $Q = 38,0$ л/с и принятых параметрах пласта и скважины $\gamma \lg \gamma = (1 + 2,89) / 4,12 = 0,944$ и $\gamma_s = 0,84$.

Зная величины параметров F и γ , по формулам (III. 40), (III. 41), (III. 45), (III. 46) и (III. 48) рассчитаем интенсивность притока ω_z , коэффициент гидравлического трения λ_z , среднюю радиальную скорость входа жидкости в фильтр $u(r, z)$ и потери напора внутри приемной части Δh_z . Данные расчета приведены в табл. VIII. 7 ($\gamma_s = 0,85$).

Как следует из приведенного, расчетные и фактические значения Δh_z практически совпадают (табл. VIII. 8 и VIII. 9) и, следовательно, зависимость (III. 48) может быть принята в практических расчетах.

Для определения приближенной величины фактической средней скорости входа частиц жидкости в приемную часть скважины достаточно среднюю радиальную скорость разделить на скважность

$$u = u(r_0, z) / \eta.$$

(VIII. 2)

$z, \text{ м}$	\bar{z}	ω_z	λ_z	Δh_z	$u(r_0, z), \text{ м/с}$
2,0	0,099	57	0,81	0,01	0,003
4,0	0,198	112	0,41	0,05	0,003
6,0	0,297	164	0,28	0,12	0,003
8,0	0,396	212	0,22	0,23	0,003
10,0	0,495	253	0,18	0,37	0,004
12,0	0,594	287	0,16	0,57	0,004
14,0	0,693	314	0,15	0,83	0,005
16,0	0,792	331	0,14	1,19	0,006
18,0	0,891	339	0,14	1,67	0,007
20,0	0,990	337	0,14	2,34	0,009
20,2	1,000	337	0,14	2,42	0,010

Понижение уровня воды в скважине найдем по формуле (IV. 27), учитывая, что пласт вскрыт на полную мощность ($\bar{m} = 1$). Потери напора на прохождение жидкости через приемную поверхность Δh_ψ и неперфорированные трубы Δh_T незначительны.

Согласно (IV. 27)

$$S_L = \frac{Q}{2\pi km} \left[\ln \frac{R}{r_0} + \left(\frac{2\gamma}{\sin 2\gamma} - 1 \right) \ln \frac{0,25m}{r_n} \right]. \quad (\text{VIII. 3})$$

Принимая $Q = 38 \text{ л/с}$, $R = 1500 \text{ м}$ и $\gamma_3 = 0,85$, получим $S_L = 7,85 \text{ м}$.

Определим параметр распределения притока γ , потери напора внутри приемной части Δh и понижение уровня воды в скважине при проектных дебитах $Q_1 = 30 \text{ л/с}$ и $Q_2 = 25 \text{ л/с}$. Считая $F = 46,3$, а входные скорости потока при $Q_1 = 30 \text{ л/с}$ и $Q_2 = 25 \text{ л/с}$ соответственно равными $v_L = 1,95 \text{ м/с}$ и $v_L = 1,62 \text{ м/с}$, согласно (III. 18) имеем $\gamma_L = 0,76$ и $\gamma_L = 0,71$. Отсюда по зависимостям (III. 48) и (VIII. 3) получим $\Delta h_L = 1,51 \text{ м}$ и $S_{1L} = 5,82 \text{ м}$ при $Q = 30 \text{ л/с}$, $\Delta h_{2L} = 1,05 \text{ м}$ и $S_{2L} = 4,71 \text{ м}$ при $Q_2 = 25 \text{ л/с}$.

Пример 2. Скважиной вскрыт глубокозалегающий неограниченный в плане водоносный пласт, представленный песчаниками мощностью $m \approx 30 \text{ м}$. Водопроницаемость пласта $km = 300 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент пьезопроводности $\bar{a} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сут}$. Отметка статического уровня относительно поверхности земли $h_{\text{ст}} = -2,0 \text{ м}$.

Приемная часть скважины выполнена в виде перфорированной трубы с проводочной обмоткой. Длина фильтра $L = 30 \text{ м}$, наружный диаметр $D_n = 0,114 \text{ м}$, внутренний диаметр $D_v = 0,100 \text{ м}$, параметр сопротивления приемной части $F = 64$. Длина неперфорированной части фильтра $l_\phi = 32 \text{ м}$. Длина промежуточной (рабочей) колонны, в пределах которой происходит движение воды, $l_n = 138 \text{ м}$, внутренний диаметр $D_n = 0,150 \text{ м}$. Общая длина эксплуатационной колонны от верхнего среза промежуточной колонны $l_3 = 58 \text{ м}$, внутренний диаметр $D_v = 0,252 \text{ м}$ (рис. VIII. 4, а). Статический уровень зафиксирован на глубине $h_{\text{ст}} = 3 \text{ м}$ относительно верха эксплуатационной колонны. Требуется найти понижения уровня воды в скважине в конце амортизационного периода при отбора $Q = 22 \text{ л/с}$ и оценить величину дополнительных потерь напора вследствие прохождения воды через скважину.

Для определения понижения уровня воды в скважине найдем параметр распределения притока γ при заданных параметрах пласта и скважины. По зависимости (III. 18) при $F = 64$, $k = 1,157 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$, $v_L = 2,80 \text{ м/с}$, $D_v = 0,1 \text{ м}$ и $r_n = 0,057 \text{ м}$ получим $\gamma \tan \gamma = 0,81$. Откуда согласно рис. II. 2 $\gamma = 0,8$.

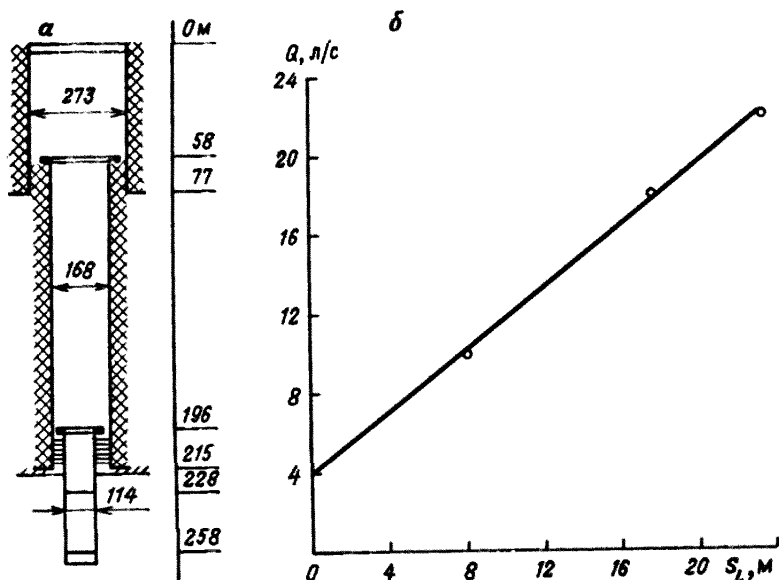


Рис. VIII. 4. Конструкция скважины (а) и зависимость дебита от понижения уровня воды (б)

По номограмме (см. рис. 1, е приложения) найдем потери напора при движении воды через неперфорированную часть фильтра Δh_{ϕ} и промежуточную колонну Δh_{π} :
 $\Sigma \Delta h_{\tau} = \Delta h_{\phi} + \Delta h_{\tau} = 2,9 + 4,3 = 8,2 \text{ м.}$

Отсюда (без учета потерь напора в эксплуатационной колонне) за время $t = 25$ лет при $a = 1 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{сут}$ согласно формуле (IV. 27) $A_L = 2 \cdot 0,8 / (\sin 2 \cdot 0,8) = 1,6$.

$$S = \frac{22,0 \cdot 86,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 30} \left[\ln \frac{1,5 \sqrt{10^7 \cdot 9125}}{0,057} + (1,6 - 1) \ln \frac{0,25 \cdot 30}{0,057} \right] + 8,2 = 27,2 \text{ м.}$$

В связи с тем что отметка статического уровня относительно верха эксплуатационной колонны $\Delta h_{\text{ст}} = -3 \text{ м}$, а понижение уровня воды $S \approx 27 \text{ м}$, максимальная длина эксплуатационной колонны, в пределах которой происходит движение воды, $l = 25 \div 28 \text{ м}$. Согласно рис. 1, е приложения потери напора в эксплуатационной колонне составляют $\Delta h_{\pi} = 0,04 \text{ м}$ и их можно не учитывать.

Если пренебречь потерями напора вследствие прохождения жидкости через скважину, то понижение уровня воды за $t = 25$ лет составит:

$$S_L = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{1,5 \sqrt{a t}}{r_n} = 16 \text{ м.}$$

Из сравнения величин понижений уровня воды, полученных при учете потерь напора внутри скважины и при пренебрежении ими следует, что дополнительные потери при $F = 64$ составляют около 41 % от общего понижения уровня. Дополнительные потери напора вследствие движения воды через скважину можно также

найти, суммируя потери напора в неперфорированных трубах с потерями напора внутри приемной части от нейтральной точки до выходного сечения фильтра $z = L$.

Учитывая однородность пласта и практически полное его вскрытие, по формуле (IV. 36) определим относительную ординату нейтральной точки \bar{z}_H . Принимая $\varphi \rightarrow 1$ и $\bar{m} = 1$, получим

$$z_H = \frac{1}{0,8} \arccos \sqrt{\frac{0,8}{\operatorname{tg} 0,8}} = 0,61 \text{ и } z_H = 18,3 \text{ м.}$$

Отсюда дополнительная потеря напора вследствие движения воды в приемной части скважины в интервала $z_H - L$ согласно (VI. 30)

$$\Delta h_H = \frac{0,022^2}{9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 0,1^4} (64 + 16) \left[1 - \frac{\operatorname{tg}^2 (0,8 \cdot 0,61)}{\operatorname{tg}^2 0,8} \right] = 2,9 \text{ м,}$$

а общие дополнительные потери напора в скважине

$$\Sigma \Delta h = \Delta h_H + \Delta h_T = 2,9 + 8,2 = 11,1 \text{ м.}$$

Аналогично найдем понижение уровня воды и общие дополнительные потери напора, обусловленные гидравлическим сопротивлением скважины, при $Q_2 = 18 \text{ л/с}$ и $Q_3 = 10 \text{ л/с}$. Соответственно получим $S_2 = 17,7 \text{ м}$, $\Sigma \Delta h_2 = 7,68 \text{ м}$ и $S_3 = 8,0 \text{ м}$, $\Sigma \Delta h_3 = 2,44 \text{ м}$.

Зависимость дебита от понижения уровня воды с учетом сопротивления скважины в рассматриваемом случае можно представить с небольшой погрешностью в виде прямой (см. рис. VIII. 4, б) несмотря на значительные дополнительные потери напора внутри ствола скважины. При этом зависимость $Q = f(S)$ пересекает ось абсцисс левее начала координат. Отсюда следует, что необходимым и достаточным условием незначительности гидравлического сопротивления скважины является прямолинейность зависимости между дебитом и понижением уровня и прохождение графика $Q = f(S)$ через начало координат. Если зависимость $Q = f(S)$ пересекает ось абсцисс левее начала координат, то это свидетельствует о наличии потерь напора внутри ствола скважины или о погрешности в определении статического уровня.

§ 3. РАСЧЕТ ДЛИНЫ ПРИЕМНОЙ ЧАСТИ СКВАЖИНЫ И СХЕМАТИЗАЦИЯ СЛОИСТОЙ ТОЛЩИ

Одним из важных элементов проектирования водозаборных сооружений, эксплуатирующих подземные воды, является обоснование длины, диаметра приемной части (фильтра) и конструкции скважины в целом. Практика показывает, что малая расчетная производительность водозабора обычно не может служить основанием для постановки разведочных работ по выявлению новых источников водоснабжения или для проектирования искусственных пополнителей запасов подземных вод (ИППВ). Водозабор может дать малое количество воды вследствие нерациональной схемы вскрытия пласта. Если для глубокозалегающих водоносных пластов возможности в выборе диаметра приемной части ограничены в связи с необходимостью крепления пород несколькими промежуточными колоннами и решающим фактором в обеспечении максимальной производительности скважины является надлежащее обоснование степени вскрытия пласта и диаметра промежуточных (рабочих) колонн,

то для небольших глубин, кроме указанного, большое значение имеет также обоснование наиболее рационального диаметра приемной части скважины. Выбор диаметра эксплуатационной колонны в обоих случаях регламентируется габаритами соответствующего насосного оборудования, обеспечивающего отбор воды, поступающей из скважины. В качестве причин, обуславливающих просчеты при проектировании водозабора, следует также отметить недостаточное внимание к учету неоднородности пласта и потерь напора, возникающих при движении жидкости через скважину.

Ниже на отдельных примерах рассмотрим способы расчета понижения уровня в скважине или ее дебита в зависимости от соответствующих параметров пласта и скважины. Примеры приводятся для предельных случаев, рассмотрение которых с практической точки зрения представляется целесообразным. Некоторая условность примеров позволяет более четко показать особенности и порядок расчета.

Пример 1. Согласно данным буровых и опытно-фильтрационных работ мощность напорного водоносного горизонта на участке $m = 20$ м, общая водопроницаемость $km = 400$ м²/сут. Откачками зафиксирована гидравлическая связь между озером и напорным горизонтом. Расстояние проектируемой скважины от озера $l = 500$ м, необходимое количество воды $Q = 30$ л/с, допустимое понижение уровня $S = 10$ м. Требуется определить приемлемую длину приемной части скважины.

Бурение предполагается проводить роторным способом с обратной промывкой водой. Наружный диаметр фильтра $D_n = 0,219$ м, внутренний диаметр $D_{в.ф} = 0,200$ м. Диаметр гравийной обсыпки $D_r = 0,8$ м. Длина глухой части фильтра в случае расположения его у кровли пласта $l_{г.ф} = 2$ м. Длина эксплуатационной колонны, в пределах которой происходит движение воды, $l_3 = 10$ м, внутренний диаметр $D_{в.3} = 0,252$ м.

Осмотр керна показал, а анализ проб подтвердил, что водоносный горизонт представлен двумя пластами разной проницаемости с тесной гидравлической связью. Поэтому дополнительно была проведена расходомерия разведочной скважины. Обработка расходомерии выявила, что мощность и средние коэффициенты фильтрации пластов, считая от поверхности земли, соответственно $m_1 = 10$ м, $k_1 = 10$ м/сут и $m_2 = 10$ м, $k_2 = 30$ м/сут. Параметр внутреннего сопротивления приемной части $F^2 = 20$.

Для выбора длины и интервала установки фильтра вначале найдем возможную производительность скважины при пренебрежении потерями напора внутри приемной части и в неперфорированных трубах. Учитывая незначительную деформацию пород в процессе заданного способа бурения, примем $\xi_2 \approx 0$.

Согласно формулам (IV. 5), (IV. 11), (IV. 16) и (IV. 18) в качестве расчетной зависимости примем

$$Q = \frac{2\pi kmS}{\ln \frac{2l}{r_r} + \xi_1^*}, \quad (\text{VIII. 4})$$

где $\xi_1^* = \left(\frac{\bar{k}m}{k_L L} - 1 \right) \ln \frac{\bar{\epsilon}m}{r_n}$; $\bar{\epsilon} = \bar{m}(1 - \bar{m})$ — при расположении приемной части

скважины у кровли или подошвы пласте; $\bar{\epsilon} = 0,25$ — в случае полного вскрытия пласта.

Производительность скважины определим для следующих пяти вариантов вскрытия:

- 1) фильтр устанавливается в верхнем пласте на расстоянии 1 м от кровли, длина приемной части $L_1 = 9$ м;
- 2) фильтр устанавливается в нижнем пласте на расстоянии 1 м от его подошвы, длина приемной части $L_2 = 9$ м;
- 3) фильтр устанавливается в верхней части водоносного горизонта, его выходное сечение находится на расстоянии 1 м от кровли, длине приемной части $L_3 = 14$ м, т.е. приемная часть вскрывает верхний и половину нижнего пласта;
- 4) фильтр устанавливается в нижней части водоносного горизонта, нулевое сечение находится на расстоянии 1 м от подошвы горизонта, длине приемной части $L_4 = 14$ м, т.е. приемная часть вскрывает нижний и половину верхнего пласта;
- 5) фильтр устанавливается практически на всю мощность горизонта, выходное и нулевое сечения не находятся на расстоянии 1 м от кровли и подошвы горизонта, длина приемной части $L_5 = 18$ м.

Кроме этого, чтобы показать возможные ошибки, возникающие при пренебрежении неоднородностью опробованной толщи, выполним расчет для случая однородного пласта, общая водопроницаемость которого равна полученной на стадии опытно-фильтрационных работ. Результаты расчетов по зависимости (VIII. 4) при $\bar{k}m = 400 \text{ м}^2/\text{сут}$ сведем в табл. VIII. 8.

Определим необходимость учета потерь напора в рабочей части фильтра для наиболее неблагоприятного случая: $L = 20$ м и $v_L = 1,1 \text{ м/с}$ ($Q_v \approx 3,1$ тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$). Принимая $D_{в.ф} = 0,2$ м, $k_z = 30 \text{ м/сут} = 3,47 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$, $\bar{\epsilon} = 0,25$, $r_H = 0,109$ м и $F = 20$, по зависимости (III. 18) $\gamma\gamma\gamma = 0,092$. Отсюда по рис. III. 2 имеем $\gamma = 0,36$. Согласно палетке $\bar{v} = \gamma\gamma\gamma z / \gamma\gamma$ (рис. 2 приложения) приток внутри приемной части практически равномерен, и, следовательно, потерями напора в рабочей части фильтра можно пренебречь при всех вариантах его установки.

Потери напора в неперфорированной части фильтра и эксплуатационной колонне рассчитаем также для наиболее неблагоприятного случая (установка фильтра в нижнем пласте): $l_{ф} = 12$ м; $D_{в.ф} = 0,2$ м; $l_3 = 10$ м; $D_{в.3} = 0,25$ м; $Q = 2604 \text{ м}^3/\text{сут} = 30,1 \text{ л/с}$.

Таблица VIII. 8

Номер варианта	Пласт								
	неоднородный						однородный		
	\bar{m}	$\bar{\epsilon}$	$\bar{k}_L L$	$\frac{\bar{k}m}{\bar{k}_L L} - 1$	$\bar{\xi}_1^*$	$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$	$\frac{m}{L} - 1$	$\bar{\xi}_1^*$	$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$
1	0,45	0,248	90	3,44	13,1	1200	1,22	4,66	2014
2	0,45	0,248	270	0,48	1,83	2604	1,22	4,66	2014
3	0,70	0,210	240	0,67	2,45	2447	0,43	1,57	2676
4	0,70	0,210	320	0,25	0,91	2879	0,43	1,57	2676
5	0,90	0,25	360	0,11	0,42	3050	0,11	0,92	3050

Согласно рис. 1, ж приложения в неперфорированной части фильтра $\Delta h_{\phi} = 0,11$ м и эксплуатационной колонне $\Delta h_3 = 0,03$ м. Полученный результат свидетельствует о возможности пренебрежения потерями напора внутри скважины и допустимости использования данных табл. VIII. 8 для определения рациональной длины и интервала установки фильтра.

Кек видно из табл. VIII. 8, с точки зрения гидрогеологии наиболее оптимален при заданном диаметре приемной части $D_{н.ф} = 0,109$ м и необходимом количестве воды $Q = 30$ л/с второй вариант вскрытия, при котором фильтр длиной 9 м устанавливается в нижнем пласте. При установке фильтра той же длины в верхнем пласте производительность скважины будет в 2 раза ниже. Если считать пласт однородным, то в зависимости от места установки фильтра минимальная и максимальная ошибки в определении производительности скважины при $L = 9$ м соответственно равны 23 и 68 %, а необходимая длина фильтра для получения потребного количества воды составит 14 м вместо фактической 9 м.

Пример 2. Для временного водоснабжения необходимо соорудить эксплуатационную скважину, которая при допустимом понижении уровня $S = 20$ м обеспечит расход $Q = 20$ л/с. Расчетное время эксплуатации скважины $t = 10$ лет. Требуется определить длину и интервал установки приемной части скважины.

Согласно изысканиям, проведенным в районе работ, средняя мощность неограниченного в плане напорного неоднородного водоносного пласта составляет 34 м. Общая водопроницаемость пласта $\bar{k}m = 468$ м²/сут, коэффициент проницаемости $\bar{\alpha} = 5 \cdot 10^{-6}$ м²/сут. Расходомерная скважина при $Q = 23$ л/с показала, что зависимость $Q = f(z)$ представляет собой ломаную. Это свидетельствует о равномерном распределении притока в пределах фиксируемых интервалов и, следовательно, о незначительности потерь напора внутри фильтра и через его отверстия. По данным кустовой откачки из совершенной по степени вскрытия скважины при бурении вращательным способом с промывкой забоя глинистым раствором $\bar{z}_2^* = 4,2$ м; следовательно, согласно (IV. 3) и (IV. 12)

$$(\xi_n + \xi_{\phi}) = \bar{z}_2^* \frac{\bar{k}L}{\bar{k}m} = 4,2.$$

Учитывая незначительность потерь напора при прохождении воды через приемную поверхность фильтра и внутри него, исходную зависимость (IV. 3) с учетом (IV. 11) и (IV. 12) запишем в виде

$$S = \frac{Q}{2\pi \bar{k}m} (R + \bar{z}_1^* + \bar{z}_2^*) + \Delta h_{\gamma} \quad (\text{VIII. 5})$$

где R — коэффициент гидравлического сопротивления пласта при притоке жидкости к гидродинамически совершенной скважине;

$$\bar{z}_1^* = \left(\frac{\bar{k}m}{\bar{k}L} - 1 \right) \ln \frac{em}{r_n} \quad \text{и} \quad \bar{z}_2^* = \frac{\bar{k}m}{\bar{k}L} (\xi_n + \xi_{\phi}).$$

Из (VIII. 5) простым преобразованием получим зависимость

$$\frac{\bar{k}L}{\bar{k}m} = \frac{\ln(em/r_n) + (\xi_n + \xi_{\phi})}{[2\pi \bar{k}m (S - \Delta h_{\gamma})/Q] - [R - \ln(em/r_n)]}, \quad (\text{VIII. 6})$$

по которой определяется отношение водопроницаемости вскрытой части пласта к общей мощности, удовлетворяющее условию получения необходимого количества воды Q при заданном (допустимом) понижении уровня воды S .

Для расчета рациональной длины приемной части скважины необходимо вначале найти отношение (VIII. 6), а затем по графику $\bar{m} = f(\bar{k}L/\bar{k}m)$, выполненному для конкретной схемы строения и проницаемости водоносного горизонта, определить значение степени вскрытия пласта $\bar{m} = L/m$ и соответственно длину фильтра L .

Исходя из опыта работ на данном участке примем конструкцию скважины с наружным диаметром фильтра 0,168 м. Способ бурения — вращательный с промывкой забоя глинистым раствором. На основании кустовой откачки ($\xi_n + \xi_\phi$) = 4,2.

В соответствии с конструкцией скважины и заданным дебитом $Q = 20$ л/с по номограммам [16] потери напора в глухой части фильтра и в колоннах обсадных труб $\Delta h = 5,4$ м.

Для неограниченного в плане пласта примем $R = \ln(1,5\sqrt{at}/r_n)$, откуда

$$R - \ln \frac{em}{r_0} = \ln \frac{1,5\sqrt{at}}{em} = \ln \frac{1,5\sqrt{5 \cdot 10^6 \cdot 3650}}{0,25 \cdot 34} = 10,08.$$

Учитывая (VIII. 6) и считая $\epsilon = 0,25$, найдем отношение водопроводимостей вскрытой части пласта к общей, удовлетворяющее условию получения необходимого дебита $Q = 20$ л/с при заданном понижении уровня $S = 20$ м:

$$\frac{\bar{k}L}{\bar{k}m} = \frac{\ln(0,25 \cdot 34 / 0,084) + 4,2}{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 468 (20,0 - 5,4)}{20 \cdot 86,4} - 10,08} \approx 0,6.$$

С целью иллюстрации важности учета неоднородности пласта при определении длины и интервала установки фильтра рассмотрим расчет рациональной длины для однородного и неоднородного трехслойного пласта при различном расположении слоев относительно друг друга.

Условия расчета приведены ниже.

Номер варианта	1	2	3
Мощность слоя (пласта), м:			
m_1	12	14	—
m_2	8	8	—
m_3	14	12	—
m	34	34	34
Коэффициент фильтрации, м/сут:			
k	30	2	—
k_1	10	10	—
k_2	2	30	—
k_3	—	—	14

Общая водопроводимость пласта во всех рассматриваемых случаях $\bar{k}m = 468 \text{ м}^2/\text{сут}$.

В соответствии с принятыми схемами строения и проницаемости водоносного пласта определим величины водопроводимости вскрытой части пласта по мере увеличения длины фильтра, считая начало координат в кровле пласта. При этом начало фильтра расположим на 1 м ниже кровли (табл. VIII. 9, графы 1 — 3). Затем рассчитаем величины относительного вскрытия пласта $\bar{m} = L/m$ и отношение водопроводимостей $\bar{k}L/\bar{k}m$ (табл. VIII. 9, графы 4 — 5).

Согласно зависимости $\bar{m} = f(\frac{\bar{k}L}{\bar{k}m})$ (рис. VIII. 5) для первого варианта, т.е. при расположении более проницаемого пласта сверху, $\bar{m}_1 = 0,27$ и $L_1 = 9,2$ м;

z, м	L, м	Номер варианта					
		$\bar{k}L$	\bar{m}	$\bar{k}L/\bar{k}m$	$\bar{k}L$	m	$\bar{k}L/\bar{k}m$
4	3	90	0,088	0,192	6	0,088	0,013
8	7	210	0,206	0,449	14	0,206	0,030
12	11	330	0,324	0,705	22	0,324	0,047
14	13	350	0,382	0,748	26	0,382	0,056
16	15	370	0,441	0,791	46	0,441	0,098
18	17	390	0,500	0,833	66	0,500	0,141
20	19	410	0,559	0,876	86	0,559	0,184
22	21	414	0,618	0,885	106	0,618	0,226
26	25	422	0,735	0,902	226	0,735	0,483
30	29	430	0,853	0,919	346	0,853	0,739
34	33	438	0,971	0,936	466	0,971	0,996

для второго варианта (более проницаемый пласт снизу) $\bar{m}_2 = 0,79$ и $L_2 = 26,9$. Для третьего варианта (однородный пласт) относительное вскрытие пласта равно отношению водопроводимостей вскрытой части пласта к общей, т.е. $\bar{m}_3 = 0,6$ и $L_3 = 20,4$ м.

Из приведенного примера видно, насколько важен учет неоднородности пласта в проектировании скважин на воду. При расчете ряда эксплуатационных скважин необходимо учесть дополнительное понижение уровня ΔS от действия смежных скважин, которое может быть получено методом суперпозиции или из имеющихся решений.

Пример 3. По данным детальной разведки водоносный пласт на участке водозабора сложен двумя гидравлически связанными слоями разной проницаемости. Верхний слой мощностью $m_1 = 10$ м представлен крупно- и среднезернистыми песками,

нижний слой мощностью $m_2 = 8$ м — мелкозернистыми песками с примесью глинистых частиц. Общая водопроводимость пласта $\bar{k}m = 300$ м²/сут. Опытнo-фильтрационные работы позволили установить незначительность нарушений в призабойной зоне при принятом способе вскрытия пласта. Обработка данных расходомерии несовершенной скважины, приемная часть которой полностью вскрыла верхний и частично нижний слой, показала, что отношение коэффициентов фильтрации слоев

$$n = k_1/k_2 = 16,3.$$

(VIII. 7)

Требуется определить возможность замены реальной двухслойной толщи простейшей фильтрационной схемой однородного пласта с мощностью и коэффициентом фильтрации, равными мощности и соответствующему коэффициенту первого слоя.

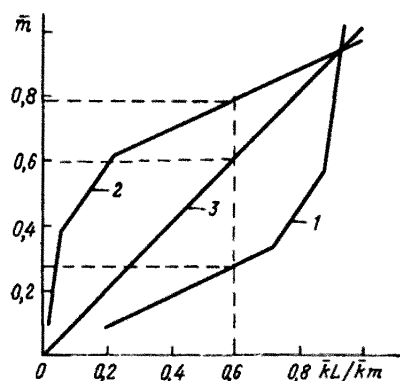


Рис. VIII 5. Зависимость степени вскрытия пласта от отношения водопроводимостей:

1, 2, 3 — номера вариантов

Примем, что замена неоднородной толщи однородным пластом возможна, если дополнительным притоком вследствие перетакания из нижнего слоя можно пренебречь. Согласно (IV. 19) таким притоком из нескрытой части пласта можно пренебречь при $\bar{k}m/\bar{k}_L L \rightarrow 1$. Отсюда с точностью до 5 % в качестве критерия возможности пренебрежения дополнительным притоком имеем

$$\bar{k}m/\bar{k}_L L \leq 1,05 \quad (\text{VIII. 8})$$

или, учитывая, что

$$\bar{k}m = \bar{k}_L L + \sum_{i=1}^n (km)_{i+1}, \quad (\text{VII. 9})$$

где $\sum_{i=1}^n (km)_{i+1}$ — водопроводимость нескрытой части неоднородного пласта, получим

$$\bar{k}_L L / \sum_{i=1}^n (km)_{i+1} \geq 20. \quad (\text{VIII. 10})$$

Таким образом, если отношение водопроводимостей вскрытой части пласта к водопроводимости нескрытой более 20, то схема слоистого пласта с горизонтальной границей между слоями и тесной гидравлической связью может быть заменена простейшей схемой однородного пласта, мощность которого L , а средний коэффициент фильтрации \bar{k}_L .

Для определения в рассматриваемом примере возможности замены двухслойной толщи простейшей фильтрационной схемой однородного пласта найдем величину $k_1 m_1$ и отношение $k_1 m_1 / k_2 m_2$. Согласно (VIII. 9) $km = \bar{k}_1 m_1 + k_2 m_2$. Выразая $k_2 m_2$ через отношение (VIII. 7), окончательно получим

$$k_1 m_1 = \frac{\bar{k}m}{1 + \frac{m_2}{nm_1}} = \frac{300}{1 + \frac{8}{16,3 \cdot 10}} = 286 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Отсюда $k_2 m_2 = 14 \text{ м}^2/\text{сут.}$, а $k_1 m_1 / k_2 m_2 = 20,4$. Следовательно, при расчетах дебита или понижения уровня с погрешностью не более 5 % неоднородный пласт может быть заменен однородным пластом мощностью $L = 10$ м с коэффициентом фильтрации $k = 28,6 \text{ м/сут.}$

Рассмотренные в настоящем и предыдущем параграфах примеры показывают, насколько важно при определении оптимальной длины приемной части скважины знать фильтрационные свойства разреза, полученные с помощью расходомерии. Последняя — единственный способ достоверной оценки степени неоднородности пласта, сложенного трещиноватыми и кавернозными породами. Как следует из приведенного выше, оптимальная длина приемной части скважины — функция от количества отбираемой воды, допустимого (заданного) понижения уровня, длины и диаметра фильтра, обсадных труб и эксплуатационной колонны, параметра внутреннего сопротивления приемной части, общей водопроводимости пласта, коэффициентов фильтрации отдельных слоев и степени гидравлической связи между слоями.

В натуральных условиях наличие или отсутствие тесной гидравлической

связи между слоями можно установить, проведя на скважине интервальные откачки из каждого слоя и совместную откачку из всех слоев. Если сумма дебитов при откачке каждого из слоев меньше величины суммарного дебита при одновременной откачке из всех слоев, то это свидетельствует о наличии тесной гидравлической связи. При равенстве суммы дебитов суммарному дебиту гидравлическая связь между слоями незначительна и, следовательно, в пласте имеются выдержанные по площади слабопроницаемые перемычки.

Понятие оптимальности длины приемной части и конструкции скважины в целом довольно неоднозначно. Для системы скважин элементами водозабора являются также водоподъемные установки, сборные водоводы, насосные станции и резервуары. Поэтому оптимальное решение может быть найдено после рассмотрения работы всех элементов водозаборного сооружения. Кроме того, при выборе оптимума приходится учитывать и конъюнктурные условия: наличие обсадных труб, фильтра соответствующего диаметра и необходимого типа водоприемной поверхности, соответствующих водоподъемных установок, дефицитность указанного оборудования и т.п.

§ 4. ВЫБОР ДИАМЕТРА ПРИЕМНОЙ ЧАСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ СКВАЖИНЫ

Как указывалось в § 3 настоящей главы, для глубокозалегающих водоносных горизонтов конструкция скважины определяется особенностями проводки скважины в конкретных гидрогеологических условиях, и поэтому выбор диаметра ее приемной части ограничен. Подбор рационального конечного диаметра имеет смысл лишь при небольших глубинах залегания водоносного пласта, предназначенного к эксплуатации. Однако во всех случаях при проектировании эксплуатационных скважин нужно стремиться к минимально возможным диаметрам приемной части и промежуточных (рабочих) колонн. Переход на сооружения скважин малого диаметра приведет к уменьшению себестоимости 1 м проходки, снижению металлоемкости скважин и позволит при определенном объеме капитальных затрат пробурить большее число скважин.

Проведенные во ВНИИморгео теоретические и экспериментальные исследования в лабораторных и натурных условиях показали, что проявляемая в практике сооружения скважин тенденция к оборудованию ее приемной части фильтром как можно большего диаметра не всегда оправдана с точки зрения обеспечения заданной производительности. Особенно это относится к скважинам, приемная часть которых оборудуется с использованием гравийной обсыпки, а сами скважины расположены вблизи водоемов или инфильтрационных бассейнов.

Согласно выполненным исследованиям производительность скважины

зависит от потерь напора в пласте, призабойной зоне, приемной части скважины, промежуточной и эксплуатационной колоннах. Причем для скважин разного диаметра и одинаковой степени вскрытия пласта основное влияние на производительность высокодебитной скважины оказывают потери напора в приемной части и промежуточной колонне. Влияние диаметра скважины на величину потерь напора у ее наружной стенки незначительно (особенно при наличии гравийной обсыпки). Как следствие этого в качестве основного критерия целесообразности перехода на малый конечный диаметр можно принять разность между величинами дополнительных потерь напора в приемной части и промежуточной колонне, полученную расчетным путем для обоих вариантов конструкции скважин. Кроме того, необходимо учитывать интенсивность коьматационных и суффозионных процессов в районе сооружения скважин.

Пример. Мощность напорного водоносного пласта на участке проектируемого водозабора $m = 22$ м, общая водопроницаемость пласта $Km = 660$ м²/сут, средний коэффициент фильтрации пород $k = 30$ м/сут. Ранее сооружаемые скважины производительностью 20 л/с имели следующую конструкцию.

Эксплуатационная колонна

Диаметр D_3 , мм.	273
Длина l_3 , м.	50
Длина $l_{3д}$ в пределах которой происходит движения воды, м.	32

Фильтр

Диаметр D_H , мм.	219
Длина, м:	
рабочей части L	20
неперфорированной части l_{Φ}	5
отстойника l_O	1

Фильтровая колонна установлена вплотай.

Техническая характеристика предлагаемой конструкции скважины приведена ниже.

Эксплуатационная колонна

Диаметр D_3 , мм.	219
Длина l_3 , м.	20
Длина $l_{3д}$ в пределах которой происходит движение воды, м.	5

Промежуточная колонна

Диаметр D_H , мм.	168
Длина l_H , м.	30
Длина $l_{пд}$ в пределах которой происходит движение воды, м.	27

Фильтр

Длина D_H , мм.	108
---------------------------	-----

Длина, м:

рабочей части L'	20
неперфорированной части l_{ϕ}	5
отстойника l_o	1

Соединение промежуточной и эксплуатационной колонны осуществляется сваркой при обсадке ствола скважины. Фильтровая колонна устанавливается в плотай

Требуется определить разность понижений уровня воды в скважинах различной конструкции при отборе $Q = 20$ л/с и экономии металла при переходе на конструкцию малого диаметра.

Вычислим дополнительные потери напора в приемной части скважины и колоннах обсадных труб, считая, что общее понижение уровня воды на заданный период эксплуатации не превысит 13 — 15 м от верха эксплуатационной колонны. Расчет произведен для следующих значений параметра сопротивления приемной части скважины: $F_1 = 40$, $F_2 = 20$ и $F_3 = 10$. Методика расчета дополнительных потерь напора аналогична приведенной в предыдущих примерах. Результаты расчета приведены ниже (под скважинами № 1 и 2 подразумеваются соответственно конструкции большого и малого диаметра).

Номер скважины	1	2	1	2	1	2
F	40	20	10			
Δh_r , м	0,06	1,21	0,06	1,21	0,06	1,21
Δh_n , м	0,10	1,74	0,06	1,07	0,04	0,76
$\Sigma \Delta h$, м	0,16	2,95	0,12	2,28	0,10	1,97
$\Delta (\Sigma \Delta h)$, м	2,79		2,16		1,87	

Расчет массы обсадных труб и фильтровой колонны, представленной в виде неперфорированной части и трубчатого фильтра с круглой перфорацией, помещен ниже.

Номер скважины	1	2
Диаметр трубы, мм:		
наружный D_n	273,1	219,1
внутренний D_v	255,1	201,1
Толщина стенки трубы, мм	9	9
Длина колонны труб l , м	50	26
Масса труб, кг:		
1 м	58,6	46,6
колонны	2930	1932
общая	4142	2220

Из сопоставления расчетных данных видно, что при потерях напора 2 — 3 м экономия металла при переходе на малые диаметры составит 1,9 т, т.е. около 46 %. Зная общую величину понижения уровня в скважинах разной конструкции, можно определить эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью дополнительного подъема воды на высоту $h \approx 2 \div 3$ м. Окончательное решение о выборе приемлемого варианта может быть принято после рассмотрения вопроса об интенсивности коагуляционных и суффозионных процессов в районе сооружения скважины, сравнения ожидаемых затрат и при учете соответствующих конъюнктурных условий.

В приведенном примере показан предельный случай сопоставления двух вариантов, при котором экономия металла достигает 46 %. Однако

можно утверждать, что внедрение метода расчетного обоснования конструкций водозаборных и водопонижительных скважин позволит уменьшить их металлоемкость не менее чем на 10 — 15 %.

§ 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВСКРЫТИЯ И ОСВОЕНИЯ ПЛАСТА

К настоящему времени предложен ряд способов вскрытия и освоения пластов [5, 12, 35]. Ведутся интенсивные разработки по созданию новых промысловых жидкостей и добавок, применение которых позволило бы сохранить естественную проницаемость пород в призабойной зоне после завершения бурения и проведения откачек.

В связи с тем что показателем эффективности применения различных способов вскрытия и освоения пластов при сооружении скважин на воду является степень нарушения естественной проницаемости призабойной зоны [12], достоверно оценить тот или иной способ можно на основании интерпретации данных опытно-фильтрационных работ, которые позволят при определенных условиях найти величину параметра сопротивления, обусловленного нарушением призабойной зоны.

Очевидно, что разнообразие геолого-гидрогеологических и гидрохимических условий участка заложения скважин, а также применяемой технологии вскрытия пласта чрезвычайно осложняет оценку результата экспериментов, выполненных в различных районах разными группами исследователей. Ввиду большого числа действующих факторов достоверная сравнительная оценка апробируемых способов вскрытия и освоения пласта возможна лишь при проведении экспериментальных исследований по единой методике на специально созданном полигоне.

Эксперименты следует выполнять с соблюдением следующих условий:

1) водоносный пласт должен быть ограниченным по мощности и практически однородным по разрезу и в плане в пределах расстояния, равного его мощности;

2) скважины необходимо оборудовать фильтрами одинаковой конструкции;

3) при заданной конструкции скважин и интенсивности водоотбора потери напора в приемной части скважины и колоннах обсадных труб должны быть минимальны;

4) для исключения эффекта взаимодействия скважин между собой опытные откачки следует производить раздельно из каждой опытной скважины, при этом экспериментальный куст желательно располагать вблизи контура питания, имеющего постоянный напор (река, водоем);

5) для оценки степени неравномерности притока по длине фильтра и регистрации величин понижения у наружной стенки скважины, в при-

забойной зоне и на ее внешнем контуре экспериментальный куст должен оборудоваться пьезометрами длиной $l = 40 \div 50$ мм, наружным диаметром $d_n = 25 - 50$ мм;

б) коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности следует определять по данным понижения (восстановления) уровня воды в наблюдательных скважинах, расположенных на расстоянии не менее половины мощности пласта (в качестве наблюдательных могут использоваться опытные скважины полигона).

Пример. На опытном полигоне исследовалось влияние способа проходки скважин на проницаемость пород призабойной зоны при бурении ударным способом, роторным способом с обратной промывкой водой и роторным способом с прямой промывкой глинистым раствором. Мощность водоносного пласта $m = 20 \div 28$ м. Данные визуального отбора керна, лабораторные анализы проб породы и результаты наблюдений за понижением и восстановлением уровня в наблюдательных скважинах показали, что пласт с инженерной точки зрения может быть принят за однородный с общей водопроводимостью $km = 498$ м²/сут. Все опытные скважины оборудованы каркасно-стержневыми фильтрами с гравийной обсыпкой. Длине приемной части скважин $L = 8,5$ м. Внешний радиус гравийной обсыпки $r_r \approx 0,65$ м. Для регистрации понижения уровня у наружной стенки скважин установлены затрубные пьезометры в сечениях $z = 0$ и $z = L$. Для оценки степени нарушения призабойной зоны не одной горизонтали установлены два пьезометра. Первый пьезометр расположен внутри гравийной обсыпки на контакте обсыпки — пласт, $r_1 \approx 0,3$ м; второй — в пласте, $r_2 \approx 1$ м. Требуется определить коэффициент сопротивления ξ_n , обусловленный нарушением призабойной зоны при бурении скважин различными способами.

На стадии эксперимента расход воды из опытных скважин находился в пределах $Q = 500 \div 800$ м³/сут. Разность между напорами в затрубных пьезометрах составляла $\Delta h = 10 \div 40$ мм, что свидетельствует о незначительности потерь напора в приемной части скважины и возможности использования зависимостей, справедливых для квазиравномерного притока. Исходя из этого, для расчёта коэффициента ξ_n в качестве исходных примем формулы (IV. 5), (IV. 11) и (IV. 12), которые применительно к рассматриваемому случаю однородного пласта и малого гидравлического сопротивления приемной части скважины запишутся в виде:

для первого пьезометра, установленного не контакте обсыпка — пласт,

$$S_1 = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{R}{r_1} + \bar{\xi}_{11}^* + \bar{\xi}_{21}^* \right), \quad (\text{VIII. 11})$$

где

$$\bar{\xi}_{11}^* = \frac{1-\bar{m}}{\bar{m}} \ln \frac{em}{r_1}; \quad \bar{\xi}_{21}^* = \frac{1}{\bar{m}} \left(\frac{k}{k_n} - 1 \right) \ln \frac{r_1}{r_0}.$$

для второго пьезометра, установленного в пласте

$$S_2 = \frac{Q}{2\pi km} \left(\ln \frac{R}{r_2} + \bar{\xi}_{12}^* \right), \quad (\text{VIII. 12})$$

где $\bar{\xi}_{12}^* = \frac{1-\bar{m}}{\bar{m}} \ln \frac{em}{r_2}.$

С учетом равенств

$$\xi_n = \left(\frac{k}{k_n} - 1 \right) \ln \frac{r_n}{r_0} \quad \text{и} \quad \bar{\xi}_n^* = \bar{\xi}_{21}^* \bar{m}$$

из (VIII. 11) и (VIII. 12) простым алгебраическим преобразованием получим

$$\xi_n = \frac{2\pi k L (S_1 - S_2)}{Q} - \ln \frac{\xi}{\xi_1}, \quad (\text{VIII. 13})$$

где L — длина приемной части скважины; k — усредненный коэффициент фильтрации пласта (km/m).

Зависимость (VIII. 13) справедлива в случае однородного пласта при малых гидравлических потерях в приемной части скважины и коэффициенте вскрытия в пределах $0,1 \leq \bar{m} \leq 1,0$.

В соответствии с зависимостью (VIII. 13) рассчитаем ξ_n для опытной скважины, пробуренной роторным способом с обратной промывкой водой. Исходные данные: длина фильтра $L = 8,5$ м; мощность пласта $m = 28$ м; расстояние первого пьезометра от оси скважины $r_1 = 0,30$ м; второго — $r_2 = 1,02$ м; зафиксированная разность понижения уровня в этих пьезометрах $S_1 - S_2 = 0,45$ м, дебит скважины $Q = 515$ м³/сут.

По зависимости (VIII. 13) определим коэффициент сопротивления, обусловленный нарушением призабойной зоны,

$$\xi_n = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,78 \cdot 8,5 \cdot 0,45}{515} - \ln \frac{1,02}{0,30} = -0,39.$$

Параметр сопротивления за счет нарушения призабойной зоны

$$\bar{\xi}_{21}^* = \xi_n \frac{m}{L} = -0,39 \frac{28}{8,5} = -1,3.$$

Расчеты по другим скважинам производятся аналогичным путем. Сравнение величин ξ_n позволяет оценить эффективность различных способов вскрытия пласта. Оценка эффективности по параметру сопротивления $\bar{\xi}_{21}^*$ неприемлема при разной мощности пласта в местах заложения опытных скважин и неодинаковой длине их приемной части.

Как показывает опыт геологоразведочных работ и сооружения эксплуатационных скважин, продуктивные горизонты в большинстве случаев представляют собой совокупность пластов, неоднородных в разрезе и плане.

Задача притока жидкости к несовершенной скважине в неоднородной толще с учетом ее гидравлического сопротивления является сложной трехмерной задачей, точное гидромеханическое решение которой до сих пор не получено. К сожалению, нужды практики не позволяют ждать полного разрешения многих неясных и спорных вопросов. Поэтому даже приближенные решения данной задачи для различных частных случаев могут существенно повысить надежность проводимых инженерных расчетов. При этом в качестве необходимого условия эффективного применения полученных зависимостей в инженерных расчетах следует назвать простоту их аналитической формы и удовлетворительную сходимость результатов расчета с экспериментом и имеющимися точными решениями для тех или иных предельных условий.

С инженерной точки зрения в общей проблеме проектирования эксплуатационных скважин можно выделить два основных взаимосвязанных направления: 1) определение граничных условий, фильтрационных свойств и степени неоднородности пласта; 2) оценка влияния этой неоднородности, гидравлического сопротивления самой скважины и призабойной зоны на технологические показатели отбора жидкости.

Следует отметить, что до недавнего времени в инженерных расчетах гидравлике потока в скважине не уделялось должного внимания. Однако применение испытателей пластов и опробователей, внедрение специальных геофизических и гидравлических методов определения параметров пласта и скважины, создание эффективных методов освоения пласта, обеспечивающих большие притоки, и опыт эксплуатации скважин указывают на необходимость учета особенностей истечения жидкости из пласта в скважину как при усовершенствовании способов оценки неоднородности пласта, так и при разработке методов расчета производительности скважин.

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Наличие в пласте каптажного сооружения в виде скважины обуславливает появление деформаций потока, величина которых при прочих равных условиях зависит от степени неоднородности пласта, интенсивности отбора жидкости, конструкции и глубины заложения скважины. Возникающие при движении жидкости внутри скважины потери напора могут достигать значительных величин, и их необходимо учитывать в гидрогеологической практике.

2. В интервале приемной части скважины жидкость движется с переменным вдоль пути расходом. Вследствие потерь энергии на прохождение частиц жидкости через боковую поверхность фильтра, а также на преодоление сил инерции и трения напор по длине приемной части и внутри обсадных колонн уменьшается в направлении забой — устье скважины, а между уровнями внутри и у наружной стенки скважины существует разрыв. Движение с постоянным напором по длине приемной части невозможно. Коэффициент турбулентного трения в приемной части скважины в отличие от аналогичного коэффициента гидравлического трения в перфорированных трубах имеет иную физическую природу и пропорционален отношению скоростей присоединяемых частиц и основного потока, т.е. является переменной величиной. Диапазон значений коэффициента турбулентного трения широк: от десятков единиц в сечении $z \approx 0$ до величины, в 3 — 4 раза превышающей значения коэффициента гидравлического трения. Потери напора на преодоление сил инерции равны половине скоростного напора.

3. Для составления общего дифференциального уравнения притока жидкости к несовершенной скважине в слоистой толще достаточно найти дифференциальные уравнения движения жидкости внутри приемной части скважины и в пласте, справедливые при любом распределении интенсивности притока и напоров по длине приемной части. "Сшивание" уравнений следует осуществлять на основе принципа непрерывности давления.

Строгое описание обычными уравнениями гидродинамики течений с переменным вдоль пути движения расходом возможно в случае присоединения (отсоединения) дополнительных масс с относительной их скоростью, равной нулю, или по нормали к основному потоку. В других случаях необходим учет сил инерции присоединяемых частиц.

Ввиду незамкнутости системы уравнений для усредненного турбулентного движения вывод уравнения движения жидкости внутри приемной части скважины возможен лишь на феноменологическом уровне с использованием принципа Даламбера. Для вывода уравнения движения жидкости в неоднородной слоистой гидравлически связанной толще применим метод фрагментирования. Сущность метода заключается в разделении области фильтрации на отдельные зоны-фрагменты исходя из степени деформации потока и вида движения, интегрировании системы исходных уравнений, решении полученных дифференциальных уравнений зон относительно приведенного потенциала фильтрации и последующего дифференцирования для определения понижения уровня (напора) в пределах зоны в любом сечении z . Общее решение находится как сумма частных решений уравнений для каждой выделенной зоны. Подобный прием позволяет сократить число исходных уравнений и ввести некоторые из граничных условий непосредственно в основное дифференциальное уравнение зоны, что облегчает его решение. Наиболее простой и достаточно точный по конечному результату способ фрагментирования — представление

реальной изотропной области фильтрации в виде неоднородно-анизотропных зон с предельными значениями коэффициента пород в направлении, перпендикулярном к напластованию слоев.

4. Распределение притока и напора вдоль приемной части скважины может быть квазиравномерным и неравномерным. Степень неравномерности притока и напоров зависит от соотношения потерь напора в скважине и пласте. При соизмеримости этих потерь распределение притока неравномерное, причем объем жидкости, притекающей к боковой поверхности приемной части, возрастает по мере удаления от забоя, а в пределе почти вся извлекаемая жидкость может поступать через верхнюю часть фильтра, что необходимо учитывать при проектировании конструкций скважин.

Задачи прогнозирования величин притоков и напоров по длине приемной части, определения понижения уровня воды внутри скважины с учетом ее гидравлического сопротивления и соответствующих потерь напора можно решить, если в качестве функций, аппроксимирующих распределение средней скорости потока (расхода) по длине приемной части реальной скважины (перфорированной трубы), принять обобщенные функции распределения. Последние, получаемые путем решения упрощенного дифференциального уравнения притока, согласовываются с результатами экспериментов на физических и аналоговых моделях и вычислительным экспериментом на ЭЦВМ, который представляет собой численное решение исходного (полного) дифференциального уравнения. Диапазон параметров пласта и скважины при этом должен быть достаточно широк и охватывать возможные в практике случаи.

Рассмотрение закономерностей движения жидкости в пласте и ее истечения в приемную часть скважины (перфорированную трубу) при априорно задаваемом законе распределения скорости потока внутри скважины приведет к неверным выводам.

5. Гидродинамическое несовершенство скважины однозначно определяется величинами деформаций потока в околоскважинной области и внутри самой скважины. Помимо скин-эффекта оно проявляется в дополнительных потерях напора в приемной части и обсадных колоннах вследствие преодоления сил инерции, тяжести и трения. Влияние скважины на структуру потока в пласте сказывается лишь в непосредственной близости от нее. Причем размер зоны деформации, которую следует принимать во внимание при инженерных расчетах скважин, несовершенных по степени вскрытия и характеру распределения притока, составляет около четверти мощности пласта.

При интенсивном отборе жидкости показатели гидродинамического несовершенства зависят от дебита скважины и являются величинами, переменными по длине приемной части. Поэтому в общем случае результирующий эффект несовершенства не может быть представлен в виде суммы постоянных коэффициентов. Разделение показателей несовершенства скважины по степени и характеру вскрытия пласта нельзя считать

удовлетворительным, так как эти показатели прямо пропорциональны степени вскрытия пласта и их целесообразно объединить в одно безразмерное сопротивление. В качестве основных составляющих гидравлического несовершенства скважин можно назвать четыре параметра, различных по своему результирующему эффекту: а) суммарный параметр сопротивления, обусловленный неоднородностью пласта в разрезе, неполнотой его вскрытия, нарушением призабойной зоны и потерями напора внутри приемной части; б) параметр сопротивления, зависящий от типа водоприемной поверхности, ее скважности и эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра; в) параметр сопротивления, обусловленный движением жидкости в неперфорированной части фильтра и колоннах обсадных труб; г) параметр дополнительного сопротивления, обусловленный турбулизацией потока вблизи скважины.

Как показывает опыт сооружения и эксплуатации скважин, потери напора вследствие гидравлического несовершенства скважины соизмеримы, а в ряде случаев и больше потерь напора в пласте. Наименее прогнозируемы потери напора вследствие нарушения призабойной зоны и эффекта наложения частиц породы на проходные отверстия фильтра. Поэтому качественное вскрытие пласта с минимальным нарушением призабойной зоны и минимальными потерями на контакте порода — фильтр — основа не только повышения производительности скважин, но и достоверности гидрогеологических прогнозов, и особенно расчетов изменения качества и состава отбираемой жидкости в процессе эксплуатации.

6. Пренебрежение гидравлическим сопротивлением скважины может привести к существенным погрешностям и просчетам при: а) определении отметки динамического уровня воды в высокодебитных водозаборных скважинах; б) обосновании и выборе наиболее рациональной конструкции скважин; в) расчете коэффициента фильтрации пород по данным расходомерии и резистивиметрии скважин; г) обосновании гидродинамических моделей многослойных толщ и региональной оценке фильтрационных свойств пород; д) оценке эффективности применения тех или иных способов вскрытия пласта и использовании различных типов буровых растворов; е) оценке гидравлических характеристик применяемых фильтров, создаваемых опытных образцов и т.п.

Особенно важен учет гидравлического сопротивления скважины при интерпретации сравнительно кратковременных опытных откачек из одиночных скважин. Принципиальная трудность определения фильтрационных свойств сильнонепроницаемых пород по данным высокодебитных откачек обуславливается наличием потерь напора внутри скважины, величина которых близка к потерям в пласте или превышает их. При замерах напора или расхода внутри приемной части скважины коэффициент фильтрации (проницаемости) пород в ряде случаев можно определить по нейтральной точке, понижение уровня в которой равно понижению уровня в скважине с нулевым гидравлическим сопротивлением.

Для дальнейшего совершенствования методики расчета гидравлических потерь напора следует провести экспериментальные исследования на физических моделях с целью уточнения общего вида зависимости параметра сопротивления F от длины, диаметра и скважности приемной части и нахождения его частных значений для разных типов фильтров и в случае открытого забоя.

7. Выбор рациональной конструкции эксплуатационной скважины представляет собой оптимизационную задачу, параметрами которой являются глубина заложения скважины; категория пород по буримости и их фильтрационные свойства; фильтрационные, емкостные, кольматационно-суффозионные свойства предназначенного к эксплуатации пласта, его неоднородность; степень гидравлической связи между слоями и суммарные затраты на сооружение и эксплуатацию скважины. Сложность выбора рациональной конструкции заключается в наличии нескольких критериев оптимальности, в то время как при оптимизации в общем случае можно добиться экстремума лишь для одного принятого критерия при условии, что другие параметры будут находиться в заданных пределах. Поэтому нельзя давать однозначные рекомендации по конструкции скважины и, в частности, по длине и диаметру фильтра при мощности пласта более 10 м. Обоснование конструкции скважины должно базироваться на соответствующих гидравлических, общих технико-экономических расчетах и соображениях конъюнктурного характера, имеющих значение в процессе сооружения скважин. В итоге диаметры приемной части, эксплуатационной колонны и общая металлоемкость скважины должны быть минимально возможными, а тип водоприемной поверхности должен соответствовать литологическому составу пород и обладать устойчивостью против коррозии. Как показывают результаты проведенных исследований, переход на диаметры приемной части не более 100 — 150 мм и учет неоднородности пласта позволит снизить удельную металлоемкость скважин как минимум на 10 — 12 %. При небольших глубинах залегания водоносного горизонта весьма перспективно сооружение двухствольных водозаборных скважин конструкции В.П. Ткаченко, которые позволяют осуществить водоотбор из двух стволов одновременно. Это дает возможность получить значительный дебит при незначительном проигрыше в понижении уровня воды и сэкономить металл за счет отказа от сооружения дополнительной скважины.

8. При сооружении эксплуатационных скважин чрезвычайно важен учет неоднородности пласта в разрезе и плане. Проектирование по средним значениям параметров пласта неизбежно приводит к неоправданным материальным затратам и просчетам в производительности и времени поступления некондиционной жидкости в скважину. Выделение зон "равной" проницаемости в кусочно-однородном пласте можно осуществить на основе принципа однородности. В этом случае применим графоаналитический метод. В качестве расчетной принимается формула однородного пласта:

та при соответствующих реальных граничных условиях на поверхности раздела неоднородная система — окружающая среда. Границы зон разной проницаемости находятся по точкам излома прямых, построенных в прямоугольной системе координат, в которой по оси абсцисс откладываются величины, эквивалентные сопротивлению среды, а по оси ординат — величины, эквивалентные эффекту возмущения. Данный способ выделения неоднородностей сравнительно универсален (в случае достаточного количества исходных данных), так как может быть применен при произвольном распределении проницаемости слоев (пластов) по разрезу и в плане и в этом смысле является достаточно общим. Методы выделения кусочно-однородных зон, основанные на использовании частных зависимостей для заданного соотношения проницаемости слоев неоднородного пласта или заданного распределения проницаемости по разрезу и площади, менее универсальны ввиду многообразия геологических условий и, следовательно, малой вероятности совпадения априорно принимаемой расчетной модели с фактическим строением неоднородной толщи.

9. Один из перспективных методов определения фильтрационной неоднородности разреза и гидравлических характеристик потока в скважине — метод пьезорасходомерии. Наибольшая эффективность от применения метода пьезорасходомерии может быть получена при разведке многопластовых систем, характеризующихся сложным геологическим строением и большей мощностью. Основным фактором эффективности пьезорасходомерии заключается не в экономии времени опробования и соответствующих материальных затрат по сравнению со способом интервальных откачек, а в том, что результаты интерпретации пьезорасходомерического каротажа дают возможность оперативного корректирования объема и методики буровых и опытно-фильтрационных работ в процессе разведки, позволяют лучше обосновать фильтрационную расчетную схему месторождения, выбрать наиболее рациональную систему его разработки и, как следствие этого, исключить бурение лишних скважин и сократить общее количество откачек.

Возможность применения комплекса пьезорасходомерии не ограничивается оценкой фильтрационной неоднородности разреза. Выявленные закономерности притока жидкости в скважину и полученные в результате исследований зависимости могут быть также использованы для решения вопросов о целесообразности объединения отдельных продуктивных слоев в единый фильтр и выборе эксплуатационных объектов в продуктивной толще значительной мощности, при изучении и сравнительной оценке различных способов и методов вскрытия пласта, оценке эффективности мероприятий по обработке призабойной зоны и т.п.

Большое значение пьезорасходомерические методы имеют и при изучении гидравлики высокодебитных скважин, потери напора в которых достигают значительных величин. По расходам (скоростям потока) и напорам в различных сечениях приемной части скважины можно опре-

делить параметр сопротивления приемной части F и коэффициент турбулентного трения λ_0 . Особенно важно эмпирическое определение λ_0 в необсаженных скважинах, так как его значение в каждой скважине меняется в зависимости от твердости, трещиноватости, структурных особенностей пород и технологии бурения. По-видимому, в этом случае на основании сбора и обобщения материала, ранее полученного в натурных условиях, все же не удастся подобрать приемлемую величину λ_0 , которую можно принять к расчету на новой скважине. Наличие значения эмпирического коэффициента λ_0 и коэффициентов фильтрации пород слоистой толщи дает возможность рассчитать понижение уровня воды в эксплуатационной скважине при любых ее дебитах. Последнее позволит проектировать наиболее рациональные конструкции скважин для данных гидрогеологических условий и требуемого количества воды.

Для более успешного внедрения в практику гидроразведки пластов экспрессного метода пьезорасходомерии целесообразна разработка малогабаритных высокочувствительных градиентманометров или датчиков разности давлений и проведения специальных исследований по гидравлике системы расходомер — скважина.

Весьма важной представляется разработка способов определения проводимости вскрытой части пласта на основе интерпретации данных опытно-фильтрационных и гидрокаротажных работ. Имея величины общей проводимости пласта $\bar{k}m$ и его вскрытой части $\bar{k}_L L$, по данным расходомерии можно непосредственно определить абсолютные значения коэффициентов фильтрации отдельных слоев при исследованиях в несовершенных по степени вскрытия скважинах.

10. Дальнейшее развитие технологических основ сооружения и эксплуатации скважин связано с необходимостью более глубокого изучения процессов, происходящих в неоднородном пласте, на границе породы — приемная поверхность скважины и внутри ствола скважины. При этом для получения большей информации о закономерностях притока жидкости в скважину в условиях неоднородной толщи важное значение приобретают экспериментальные исследования на физических и аналоговых моделях и в натурных условиях, которые позволят определить количественно основные закономерности и значения интересующих коэффициентов при отсутствии строгой математической формулировки поставленной задачи. Указанные модели могут использоваться для непосредственного решения технических задач и в качестве средства для облегчения изучения рассматриваемых вопросов. Анализ экспериментальных данных позволяет уточнить первичные и вторичные факторы, влияющие на исследуемый процесс, и найти наилучший подход к аналитическому или численному решению. Причем создание моделей, планирование и проведение экспериментов должно базироваться на определенной теоретической основе. Наиболее прогрессивно комплексное использование моделей различной природы и вычислительного эксперимента, в котором роль лабораторной установки выполняет ЭЦВМ.

При создании физических моделей необходимо выдерживать соответствующее геометрическое подобие. В частности, диаметр скважины-модели должен быть значительно меньше ее длины, а высота фильтрационного лотка не должна превышать его радиуса. Соблюдение этих условий гарантирует возможность прямого переноса данных радиального лотка на реальный пласт. При одновременном изучении деформаций потока в пласте и скважине фильтрационный лоток следует изготавливать в виде кругового цилиндра. Эксперимент в секторном лотке даст искаженную картину.

В натурных условиях эксперименты целесообразно проводить с помощью двухствольных скважин конструкции В.П. Ткаченко, которые позволяют без особых осложнений замерять давление и скорость потока в любых сечениях приемной части.

Опыт выполненных исследований свидетельствует о том, что электрическая сеточная модель системы пласт — скважина при сравнительно ограниченном числе блоков может с необходимой достоверностью отображать процессы фильтрации жидкости в неоднородной пористой среде к несовершенной скважине, истечение жидкости через ее приемную поверхность и движение потока внутри ствола скважины. Однако процесс настройки модели методом ручного уравнивания чрезвычайно трудоемок, и поэтому разработанный вариант не может быть рекомендован в качестве унифицированного аналогового устройства. Очевидно, что модель системы пласт — скважина должна быть гибридной, т.е. представлять собой аналого-цифровой комплекс, в котором цифровая мини-ЭВМ и соответствующие блоки-преобразователи выполняли бы при настройке все функции счета, управления и принятия решения, в то время как аналоговая (сеточная) подпрограмма использовалась для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных.

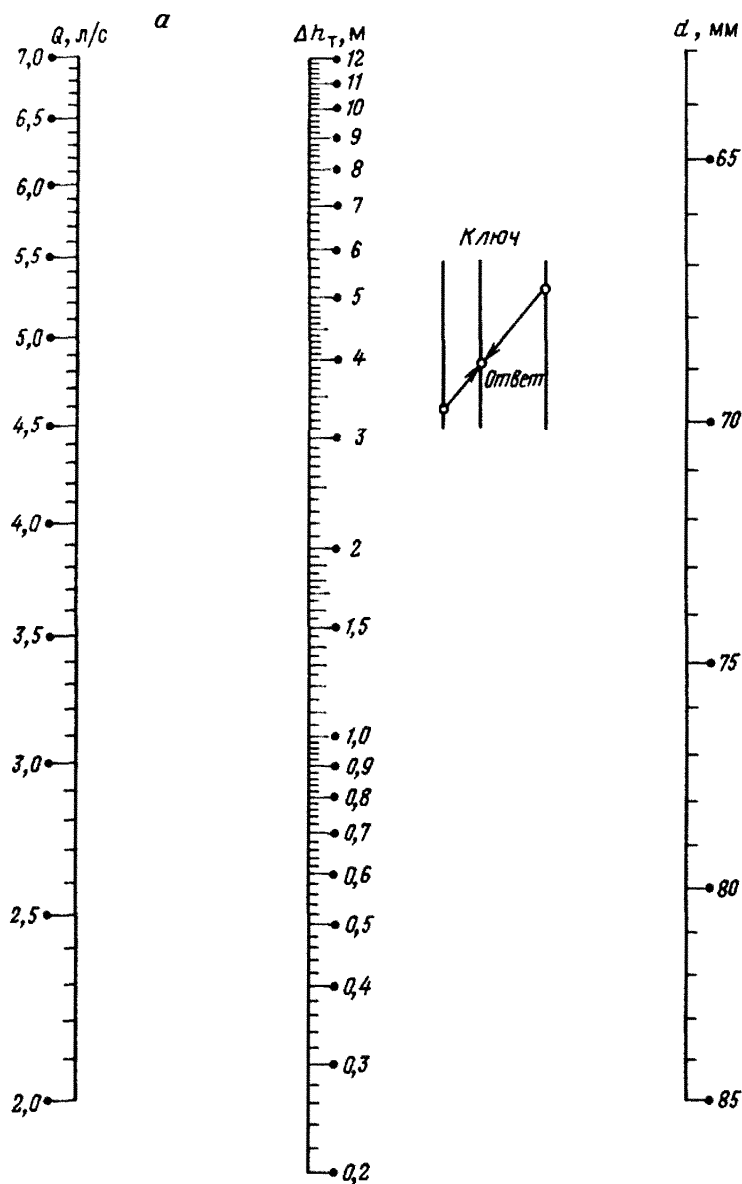


Рис. 1. Номограмма потерь напора в "новых" (а, б, в, з) и "старых" (д, е, ж) неперфорированных трубах на каждые 100 м (Δh_T)

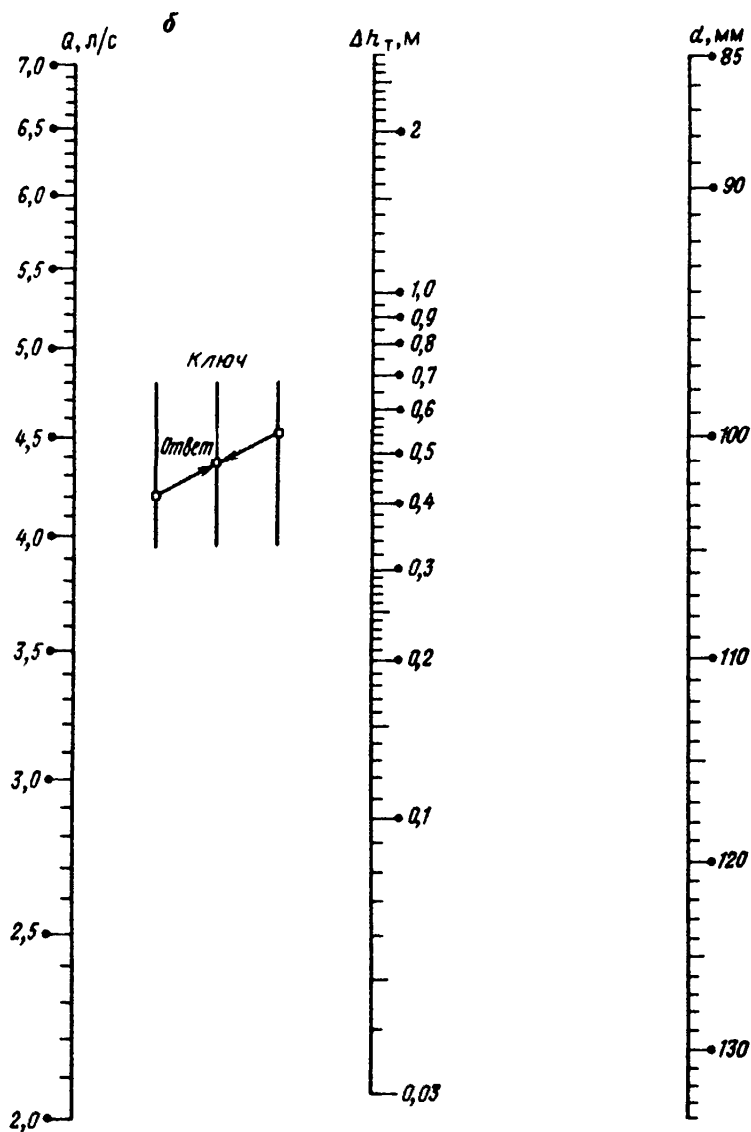


Рис. 1. (продолжение)



6

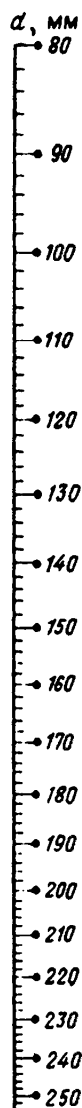
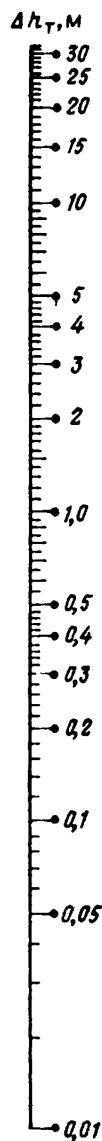
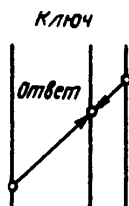


Рис. 1. (продолжение)

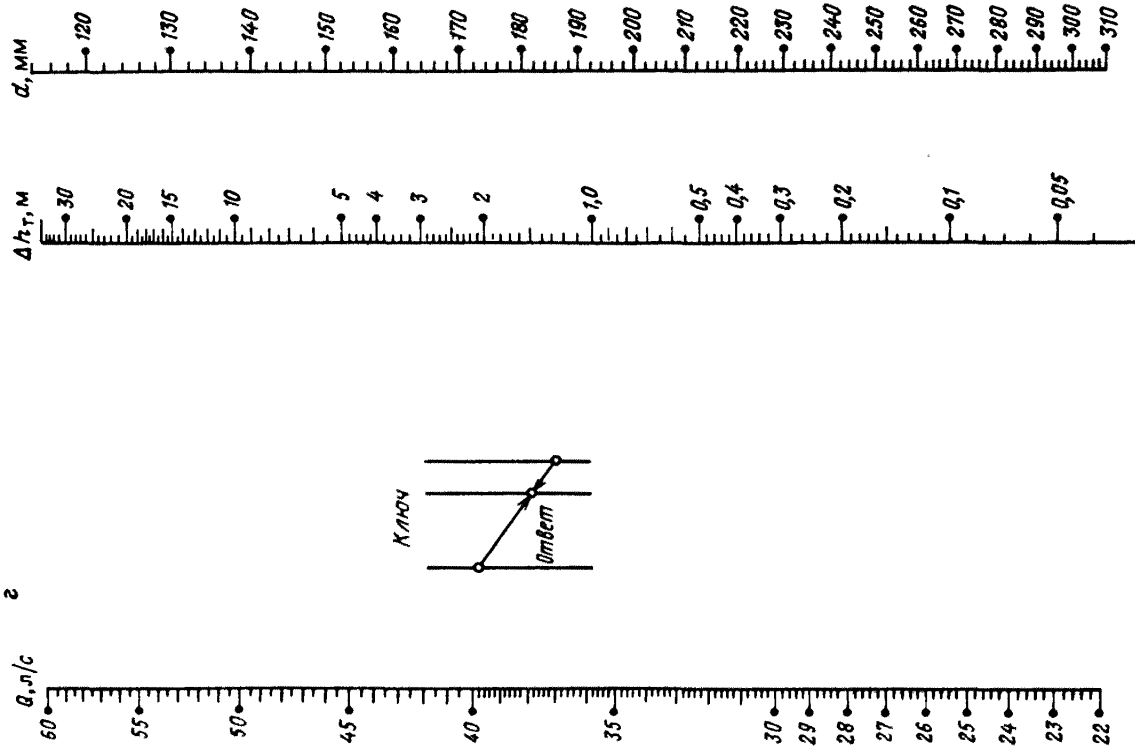


Рис. 1. (продолжение)

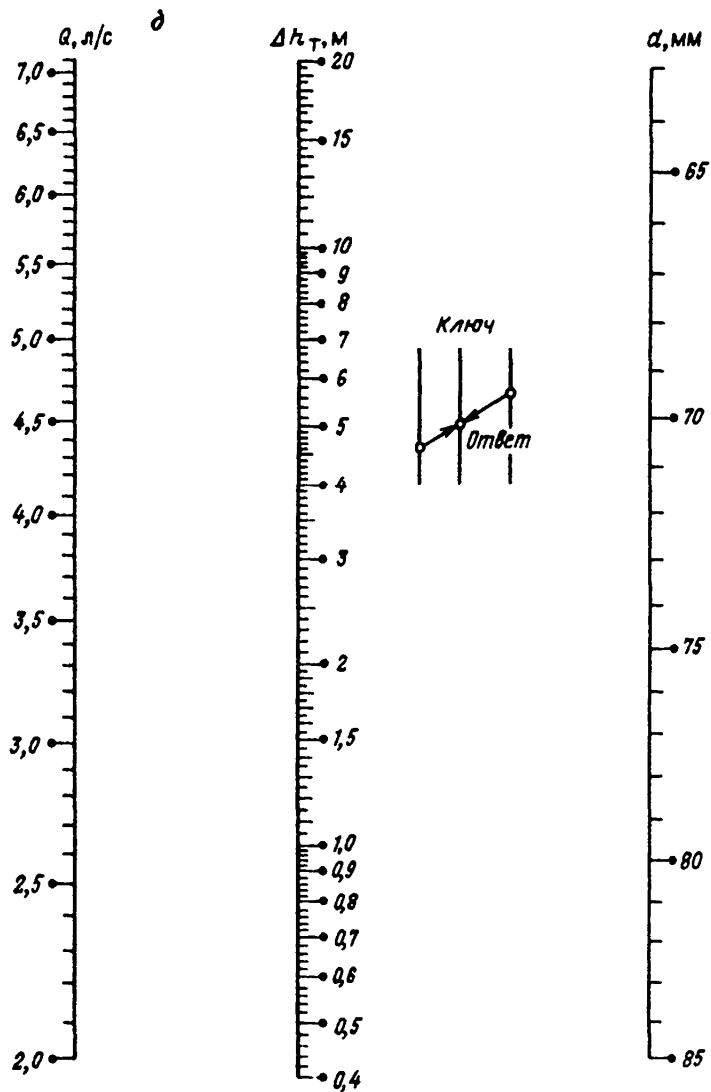


Рис. 1. (продолжение)

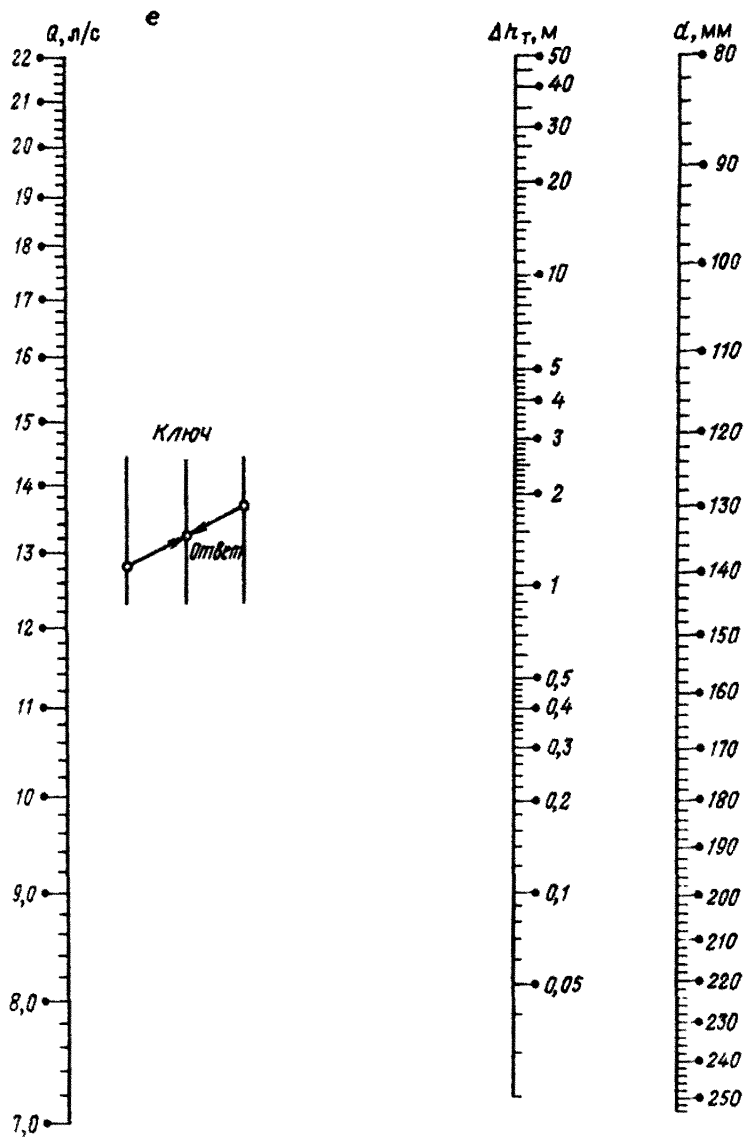


Рис. 1. (продолжение)

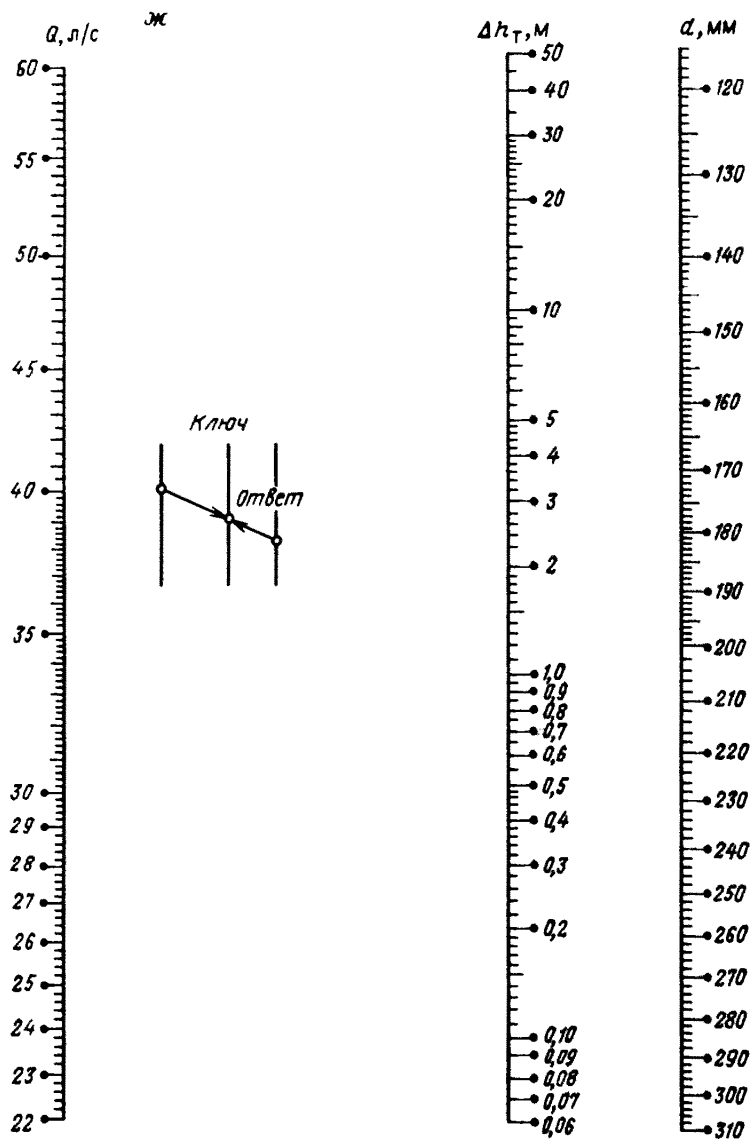
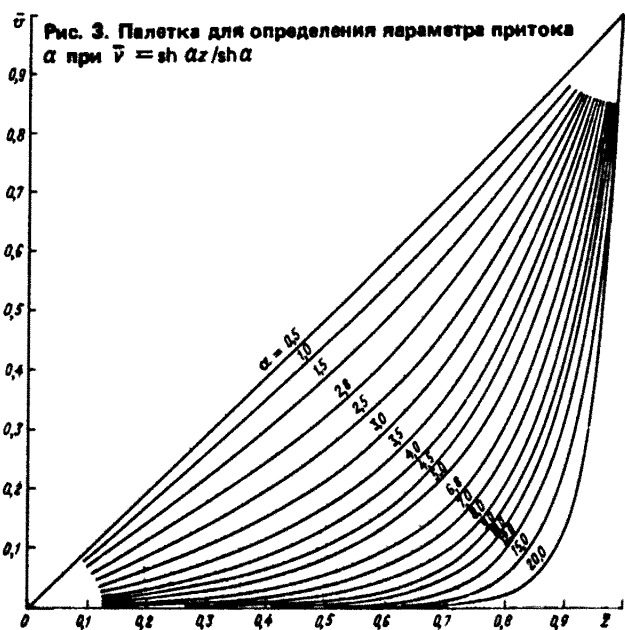
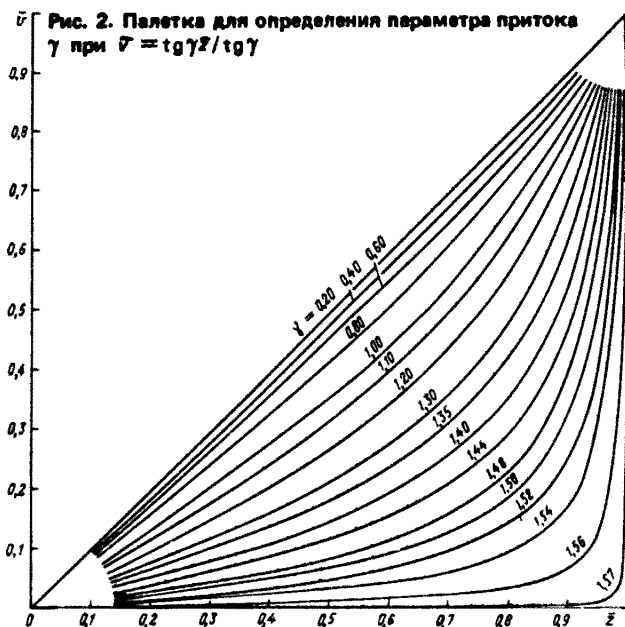
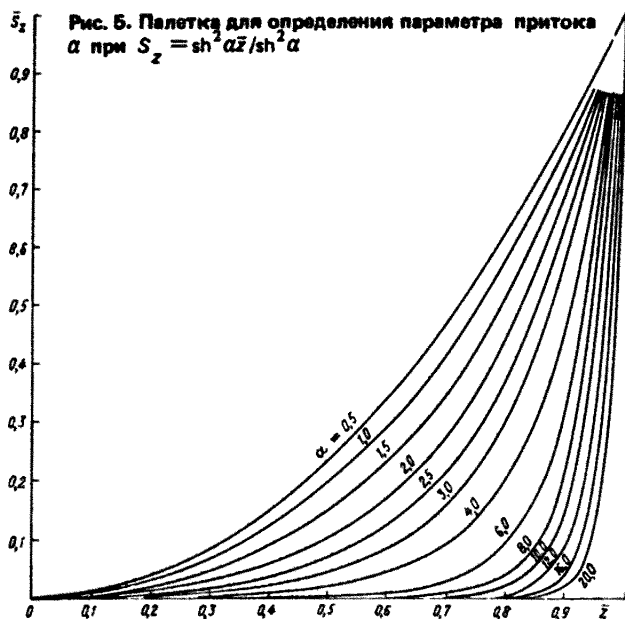
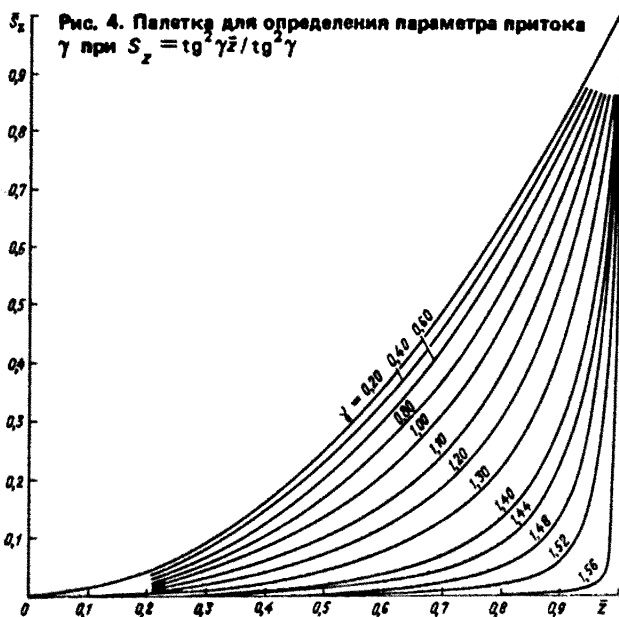


Рис. 1 (продолжение)





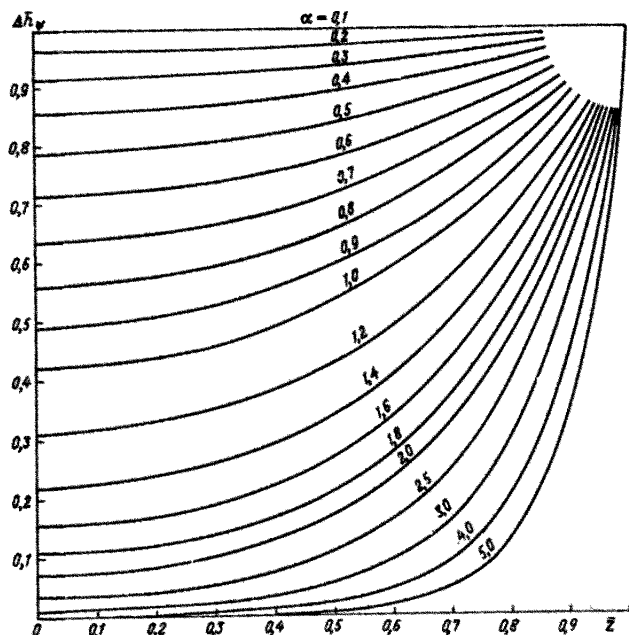


Рис. 6. Палетка для определения параметра притока α при $\Delta \bar{h}_{\psi} = ch^2 \alpha z / ch^2 \alpha$

	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
1	67	450	380	636	40	63	74	42	17
2	63	73	569	320	14	384	74	487	18
3	73	508	60	600	46	73	78	375	18
4	63	77	493	73	17	382	49	0.3	46
5	73	534	628	298	553	71	63	535	58
6	69	452	424	441	488	425	446	410	38

Рис. 7. Схема модели кусочно-неоднородного пласта:

l — ширина ($U = \text{const}$); светлые и черные кружки — соответственно эксплуатационные и наблюдательные скважины; вертикальные и горизонтальные линии — линии склейки; цифры в клетках — значение коэффициента водопроницаемости

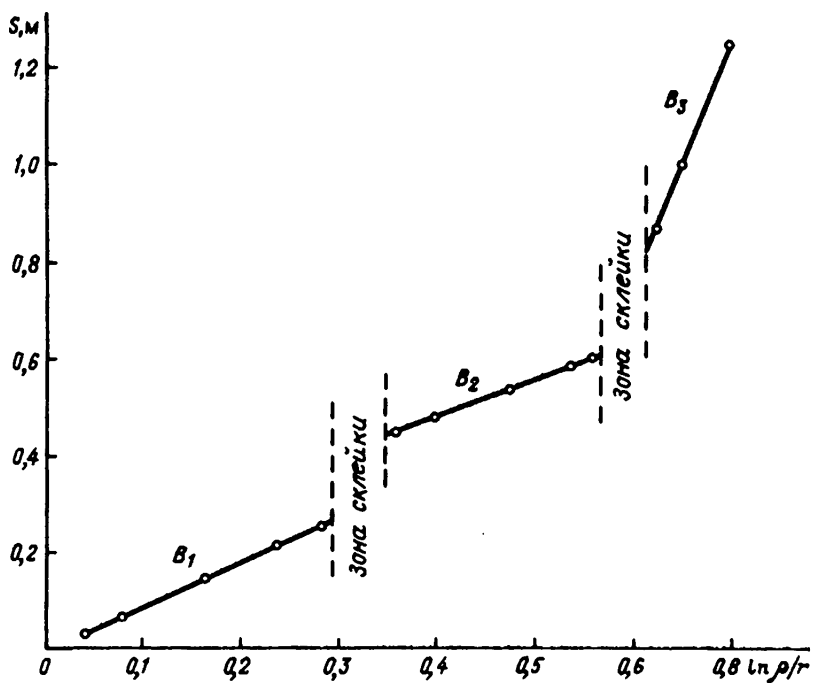


Рис. 8. Зависимость $S = f[\ln(\rho/r)]$

1. *Абрамов С.К., Донской Г.В., Кузнецова Н.А.* Гидравлика водоприемной поверхности горизонтального трубчатого дренажа. — В кн.: Труды лаборатории инженерной геологии, вып. 6, М., Госстройиздат, 1972, с. 3 — 33.
2. *Абрукин А.Л.* Потокметрия скважин. М., Недра, 1978.
3. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. М., Недра, 1970.
4. *Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.* Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., Недра, 1972.
5. *Башкатов Д.Н., Роговой В.Л.* Бурение скважин на воду. М., Колос, 1976.
6. *Борисов Ю.П., Воинов В.В., Рябинина З.К.* Влияние неоднородности пластов на разработку нефтяных месторождений. М., Недра, 1970.
7. *Бочеввер Ф.М.* Теория и практические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод. М., Недра, 1968.
8. *Василенко А.А.* Исследование движения в трубопроводах с присоединением расхода вдоль пути. — В кн.: Гидравлика и гидротехника, вып. 10, Киев, 1970, с. 41 — 48.
9. *Войнич-Сняженцкий Т.Г.* Уравнения турбулентного течения водного потока с переменным расходом вдоль пути и их решения. — Изв. ТНТИСГЭИ, т. 12 (46). М. — Л., 1960, с. 20 — 32.
10. *Волынов М.А.* Особенности гидравлического расчета труб с проницаемыми стенками. — В кн.: Проблемы территориального распределения стока рек/Тр. Союзводпроекта, вып. 49, 1978, с. 169 — 178.
11. *Гавиц И.К.* Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М., Недра, 1980.
12. *Гверилко В.М., Алексеев В.С.* Фильтры буровых скважин. М., Недра, 1976.
13. *Гершанович И.М.* Гидрогеологические исследования в скважинах методом расходомерии. М., Недра, 1981.
14. *Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород*/Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Серкисьян, Б.С. Шержуков. М., Недра, 1977.
15. *Грикевич З.А.* Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. Рига, Зинатне, 1969.
16. *Грикевич З.А.* Расчет основных параметров линейных водозаборов подземных вод. Рига, Зинатне, 1978.
17. *Гринбаум И.И.* Расходомерия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин. М., Недра, 1975.
18. *Егоров А.И.* Сбор воды дырчатыми трубами с постоянным шагом отверстий. — Водоснабжение и санитарная техника, 1972, № 6, с. 6 — 9.
19. *Ермаков А.Л., Климов А.А., Терентьев Ю.Н.* Развитие возмущений на проницаемой поверхности. — В кн.: Тепломассообмен в условиях вдува различных сред через проницаемые поверхности, вып. 9, М., 1973, с. 24 — 28.
20. *Зеегофер Ю.О., Шестаков В.М.* Вопросы методики расчета несовершенных скважин. — В кн.: Материалы по гидрогеологии/Тр. Ташкентского ун-та, вып. 425, 1972, с. 51 — 62.
21. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Машиностроение, 1975.
22. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика, т. 2. М., Физматгиз, 1963.
23. *Крашин И.И.* Моделирование фильтрации и теплообмена в водонапорных системах. М., Недра, 1976.

24. *Лапшин Н.Н.* Фильтрация подземных вод к скважинам в двухслойном напорном пласте. — Тр. ВНИИВодГео, вып. 52, 1976, с. 3 — 5.
25. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М., Наука, 1978.
26. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., Недра, 1978.
27. *Михайловский Н.Н., Германов А.И.* Потери напора на входе гидравлической системы в сносимом потоке. — В кн.: Гидравлика и гидротехника, вып. 24, Киев, 1977, с. 39 — 43.
28. *Моделирование и оптимизация процессов разработки месторождений природных газов/Ю.П. Кортаев, Н.Г. Степанов, Ю.А. Поляков, В.Г. Тагиев.* М., ВНИИГазпром, 1975, 44 с.
29. *Опыт оценки зональной проницаемости водоносных пластов/В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников, А.Д. Курманенко, В.Ф. Суханов.* — ЗИ "Гидрогеология и инженерная геология", ВИЭМС, 1973, № 1, с. 1 — 20.
30. *Петров Г.А.* Гидравлика переменной массы. Изд-во Харьковского гос. ун-та, 1964.
31. *Полубаринова-Кочина П.С., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н.* Математические методы в вопросах орошения. М., Наука, 1969.
32. *Рейнольдс Д.* Турбулентные течения в инженерных приложениях. М., Энергия, 1979.
33. *Рекомендации по гидравлическому расчету напорных трубчатых систем для сбора воды в водопроводных очистных сооружениях/Под общ. ред. В.П. Смирнова.* М., ВНИИВодГео, 1979, с. 96.
34. *Смыслов В.Н., Езерский Н.О., Зайченко В.В.* Расчет коротких распределительных трубопроводов. — В кн.: Наука и техника в городском хозяйстве, вып. 38, Киев, 1978, с. 16 — 24.
35. *Справочник по бурению скважин на воду/Д.Н. Бешкатов, С.С. Сулакшин, С.Л. Драхлис, Г.П. Квашнин, М., Недра, 1979.*
36. *Талиев В.Н.* Аэродинамика, вентиляция. М., Стройиздат, 1979.
37. *Таршин М.С., Скирдов И.В.* Оптимизация системы подвода воздуха к пневматическим аэраторам аэротенка. — Водоснабжение и санитарная техника, 1982, № 4, с. 27 — 30.
38. *Хублярян М.Г.* О совместном решении задачи о притоке к дренам и течении жидкости внутри нее. — В кн.: Совершенствование методов гидрогеологических и почвенно-мелиоративных исследований орошаемых земель/Тр. ВНИИГиМ, 1974, с. 91 — 95.
39. *Чарный И.А.* Неуставившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Недра, 1975.
40. *Чарный И.А.* Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1963.
41. *Шевалев Ф.А.* Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных и асбестоцементных водопроводных труб. М., Госстройиздат, 1962.
42. *Шестаков В.М.* Динамика подземных вод. Изд-во МГУ, 1973.
43. *Шестаков В.М.* Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. Изд-во МГУ, 1965.
44. *Шульгин Д.Ф., Васильев В.А.* Некоторые вопросы работы фильтров водозаборных скважин. — В кн.: Влияние орошения на вторичные засоления, химический состав и режим подземных вод. Ташкент, изд-во ФАН, 1964, с. 246 — 250.
45. *Aggarwal G.K., Hollingsworth M.A., Mayhew I.R.* Experiment friction factor
45. *Aggarwal G.K., Hollingsworth M.A., Mayhew I.R.* Experiment friction factor for turbulent flow with suction in a porous tube. — Inst. G. Heat Mass Transfer, 1972, vol. 15. p.p. 1585 — 1602.

46. *Garg S., Lal G.* Rational design of well screens. — Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1971, vol. 97/R, p.p. 131 — 137.
47. *Nachm. G.I.* Estimating transmissivity and well loss coefficient using test data from a pumped well. — Ground Water, 1980, vol. 18, N 3, p.p. 281 — 284.
48. *Petersen G., Rohwer C., Albertson M.* Effect of well screens on flow into wells. — Proceedings ASCE, 1954, vol. 79, sep. 365, p.p. 1 — 24.
49. *Siwon Z.O.* oporach przepływu cieczy w rurach perforowanych. Archiwum Hydrotechniki, 1974, t. 21, N 4, p.p. 584 — 604.
50. *Vincet W., Sharma G.* Results of pumping test in crystalline-rock aquifers. — Ground Water, 1978, vol. 17, N 3, p.p. 192 — 203.

Предисловие	3
Принятые обозначения.	4
Глава I. Краткий обзор ранее выполненных исследований	7
Глава II. Уравнение притока жидкости в скважину	9
§ 1. Общая постановка	9
§ 2. Зависимость между напором и скоростью потока внутри приемной части скважины	11
§ 3. Напор у наружной стенки скважины	17
§ 4. Уравнение притока жидкости в приемную часть скважины	32
§ 5. Потери напора в колоннах обсадных труб и глухой части фильтра	36
Глава III. Общее и частные решения уравнения притока жидкости в скважину	41
§ 1. Общее решение уравнения притока	41
§ 2. Частные решения уравнения притока жидкости в скважину	44
§ 3. Приближенное решение уравнения притока	49
§ 4. Решение уравнения притока методом разделения переменных	56
§ 5. Гидравлические характеристики потока и их распределение по длине приемной части	62
Глава IV. Гидродинамическое несовершенство скважин	71
§ 1. Составляющие общего сопротивления пласта и скважины	73
§ 2. Параметры гидравлического сопротивления призабойной зоны и скважины	77
§ 3. Среднее понижение уровня (напора) и нейтральная точка скважины	86
§ 4. Оценка гидравлических характеристик скважины и пласта по данным откаток из одиночных скважин	89
Глава V. Экспериментальные исследования на физических моделях и в натурных условиях	95
§ 1. Гидравлика фильтра, контактирующего с водной средой	95
§ 2. Гидравлика фильтра, контактирующего с породой	104
§ 3. Гидравлика фильтра в натурных условиях	113
Глава VI. Экспериментальные исследования на электрической модели системы пласт — скважина	121
§ 1. Принципиальная схема модели и методика моделирования	121
§ 2. Закономерности распределения скоростей и напоров в приемной части скважины и пласте	127
§ 3. Сравнения полученных расчетных формул с опытными данными	136
§ 4. Учет деформаций потока при моделировании поля фильтрации на сетках $R - R$	146
Глава VII. Методика интерпретации пьезорасходомерии скважин	153
§ 1. Оценка фильтрационных свойств пород	153
§ 2. Выделение зон равной проводимости в неоднородной толще	159
§ 3. Основные зависимости для определения коэффициента фильтрации пород	163
§ 4. Основы интерпретации пьезорасходомерии скважин	172

Глава VIII. Методы определения параметров пласта и скважины	181
§ 1. Расчет коэффициентов фильтрации неоднородной толщи	181
§ 2. Определение гидравлических параметров скважины	191
§ 3. Расчет длины приемной части скважины и схематизация слоистой толщи	195
§ 4. Выбор диаметра приемной части и возможности снижения удельной металлоемкости скважины	202
§ 5. Оценка эффективности применения различных способов вскрытия и освоения пласта	205
Заключение	208
Приложение	216
Список литературы	227

Звальд Альфонсович Грикевич

ГИДРАВЛИКА ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

Редактор издательства *А.И. Ровинская*
Обложка художника *В.Б. Золоторева*
Художественный редактор *В.В. Шутько*
Технический редактор *Л.Н. Фомина*
Корректор *Л.В. Павлова*
Оператор *И.В. Севалкина*

ИБ № 6706

Подписано в печать 03.12.85. Т—18695. Формат 60×84 1/16. Бумега офсетная № 1. Набор выполнен на наборно-пишущей машине. Гарнитура "Универс". Печать офсетная. Усл. печ.л. 13,48. Усл. кр.-отт. 13,71. Уч.-изд.л. 15,00. Тираж 3850 экз. Заказ 1319 /902—5. Цена 80 коп.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",
103633, Москва, К—12, Третьяковский проезд, 1/19
Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109033, Москва Ж-33, Волочаевская, 40.